

# ФИЗИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

# З

**МАГНИТОПЛАЗМЕННЫЙ —  
ПОЙНТИНГА ТЕОРЕМА**

Главный редактор  
А. М. ПРОХОРОВ.

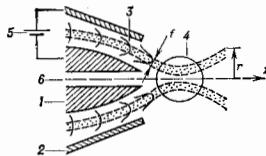
Редакционная коллегия  
Д. М. АЛЕКСЕЕВ,  
А. М. БАЛДИН,  
А. М. БОНЧ-БРУЕВИЧ,  
А. С. БОРОВИК-РОМАНОВ,  
Б. К. ВАЙНШТЕЙН,  
С. В. ВОНСОВСКИЙ,  
А. В. ГАПОНОВ-ГРЕХОВ,  
С. С. ГЕРШТЕЙН,  
И. И. ГУРЕВИЧ,  
А. А. ГУСЕВ  
(зам. гл. редактора),  
М. А. ЕЛЪЯШЕВИЧ,  
М. Е. ЖАБОТИНСКИЙ,  
Д. Н. ЗУБАРЕВ,  
Б. Б. КАДОМЦЕВ,  
Л. П. ПИТАЕВСКИЙ,  
Ю. Г. РУДОЙ  
(зам. гл. редактора),  
И. С. ШАПИРО,  
Д. В. ШИРКОВ.

Москва  
Научное издательство  
«Большая Российская энциклопедия»  
1992



**МАГНИТОПЛАЗМЕННЫЙ КОМПРЕССОР (МПК)** — плазмодинамич. система, предназначенная для реализации квази стационарных течений плазмы, сопровождающихся её сильным сжатием под действием сил инерции и собственного магн. поля. Основу МПК образуют два коаксиальных электрода (рис.), внутренний из

Схема магнитоплазменного компрессора (в разрезе): 1 — внутренний электрод; 2 — внешний электрод; 3 — элементарная трубка плазменного потока; 4 — область компрессии; 5 — источник питания; 6 — диверторный канал, направляющий подаваемые примеси в область компрессии.



к-рых имеет сужающуюся, близкую к конической, поверхность. Между электродами течёт ток разряда, создающий магн. поле; под действием возникающей силы Ампера плазма разгоняется вдоль канала. На выходе МПК поток сходится к оси, где возникает область компрессии с высокими плотностью и темп-рой. Формированию области компрессии способствуют т. н. токи выноса, текущие в выходящей плазменной струе.

Теория течений в МПК [1] в случае идеальной плазмы строится след. образом. Разбив плазменный поток между электродами на систему тонких коаксиальных потоков, можно для каждого из них записать три закона сохранения:

$$(a) \quad 2\pi r f v \rho = \text{const}; \quad (b) \quad \frac{H}{\rho r} = \text{const};$$

$$(e) \quad \frac{v^2}{2} + i(\rho) + \frac{H^2}{4\pi\rho} = \text{const} \equiv C, \quad i(\rho) = \int \frac{d\rho(\rho)}{\rho}.$$

Здесь  $r = r(z)$  — ср. радиус трубки,  $f(z)$  — её ширина,  $\rho$  и  $v$  — плотность и скорость плазмы,  $i(\rho)$  — *энпальгия* плазмы, характеризующая её тепловую энергию,  $H(z)$  — напряжённость магн. поля. Ур-ние (a) выражает закон сохранения массы, (б) — характеризует *змерзность магнитного поля* в плазму, (e) — ур-ние типа *Бернулли уравнения* для установившегося

течения несжимаемой идеальной жидкости. Если на входе в канал скорость потока и тепловая энергия малы, то  $C \approx H_0^2 / 4\pi\rho_0 = v_A^2 (v_A - \text{альевенская скорость})$ , т. е. на входе в канал энергия потока сосредоточена преим. в магн. поле. Если радиус трубки потока  $r \rightarrow 0$ , то можно реализовать т. в. компрессионный режим течения, при к-ром скорость будет изменяться мало, а магн. энергия будет переходить преим. в тепловую, т. е.  $v_A \rightarrow i(\rho_{\text{макс}})$ . Отсюда следует, что максимальные достижимые плотность и темп-ра равны:

$$\rho_{\text{макс}} = \rho_0 \left[ (\gamma - 1) \frac{v_A^2}{v_A^2} \right]^{1/(\gamma - 1)}; \quad kT_{\text{макс}} = (\gamma - 1) M v_A^2.$$

Здесь  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $v_A^2 = dp(\rho)/d\rho$ .

Внешние процессы, происходящие в окрестности области компрессии, напоминают процессы в Z-пинче (см. *Пинч-эффект*), но развернутые не во времени, а в пространстве.

Раарды в МПК могут быть в газах (водороде, воздухе и др.), а также на продуктах эрозии диэлектрика, разделяющего электроды. При раардных токах  $\sim 300$  кА на водороде получены степени сжатия  $\rho_{\text{макс}}/\rho_0 \sim 50$ , а на воздухе  $\sim 400$  [2]. Эрозионные МПК исследуются как возможные мощные источники излучения [3].

Лит.: 1) Морозов А. И., О стационарных течениях плазмы, сопровождающихся её сжатием, «ЖТФ», 1967, т. 37, № 12, с. 2147; 2) Виноградова А. К., Морозов А. И., Стационарные компрессионные течения, в кн.: Физика и применение плазменных ускорителей, Минск, 1974; 3) Камруков А. С., Ковалов Н. П., Иротасов Ю. С., Генераторы лазерного и мощного теплового излучения на основе сильноточных плазмодинамических разрядов, в кн.: Плазменные ускорители и ионные инжекторы, М., 1984. А. И. Морозов. **МАГНИТОСТАТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ** — часть энергии магнетика  $W_m$ , обусловленная магн. *диполь-дипольным взаимодействием* элементарных атомных магн. моментов (диполей). В приближении сплошной среды  $W_m$  можно представить в виде энергии взаимодействия *намагниченности*  $M$  с магнитостатич. полем  $H^m$ :

$$W_m = - \frac{1}{2} \int V M H^m dr, \quad (1)$$

где интегрирование производится по объёму  $V$  магнетика. Напряжённость поля  $H^m$  определяется из ур-ний магнитостатики (отсюда и назв. энергии  $W_m$ ):

$$\text{rot} H^m = 0, \quad \text{div} B = 0, \quad (2)$$

где  $B = H^m + 4\pi M$  — *магнитная индукция* магнетика (Ф-лы записаны в Гауссовой системе единиц). В магнетиках ограниченных размеров к (2) необходимо добавить граничные условия, заключающиеся в непре-

рности тангенциальной составляющей  $H^{(m)}$  и нормальной составляющей  $B$ :

$$(B_n, n) = (B_n), \quad H_{1\tau}^{(m)} = H_{2\tau}^{(m)}, \quad (3)$$

где  $B_1$ ,  $B_2$  и  $H_{1\tau}^{(m)}$ ,  $H_{2\tau}^{(m)}$  — индукция и напряжённости магнитостатич. полей двух соседних сред (напр., магнетик — вакуум) на границе их раздела. Индекс  $\tau$  обозначает тангенциальную составляющую  $H^{(m)}$ ,  $n$  — единичный вектор нормали к границе раздела сред. Решение ур-ний (2) с учётом (3) можно представить в виде

$$H^{(m)}(r) = -\text{grad} \left\{ -\int d\tau' \frac{\text{div} M(r')}{|r-r'|} + \int_S dS \frac{(M(r') \cdot n)}{|r-r'|} \right\}, \quad (4)$$

где  $S$  — поверхность, охватывающая объём магнетика. Из (4) видно, что  $H^{(m)}$ , а следовательно, и  $W_m$  обусловлены существованием величин  $\rho_m = -\text{div} M$  и  $\sigma_m = -(M \cdot n)$ , называемых объёмными и поверхностными плотностями магнитостатич. «зарядов», вводимых по аналогии с электростатическими. Из (4) видно также, что  $H^{(m)}(r)$  существует как в объёме магнетика, так и вне его, поскольку  $r$  относится ко всему безграничному пространству. В связи со сказанным  $W_m$  можно представить также в виде

$$W_m = \frac{1}{8\pi} \int (H^{(m)})^2 d\tau,$$

где интегрирование осуществляется по всему безграничному пространству.

М. в. играет определяющую роль при образовании доменной структуры (см. *Магнитная доменная структура*), а также магнитостатических волн в ферро- и ферримагнетиках. Она существенно влияет и на формирование структуры доменных стенок в тонких магнитных плёнках (см., напр., *Неёва стенка*).  
Лит.: Волосовский С. В., *Магнетизм*, М., 1971; Ах иезер А. И., Барьяхтар В. Г., Петелинский С. В., *Спиновые волны*, М., 1967. Б. Н. Филатков.

**МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ** — «медленные» эл.-магн. волны (с фазовой скоростью  $v_\phi \ll c$ ), сопровождающие колебания спинов в магнитоупорядоченном веществе. Обычно в приближении М. в. рассматривают ДВ-колебания спинов, в динамике к-рых влиянием обменных взаимодействий можно пренебречь (в приближении спиновых волн это взаимодействие учитывается). Волновые числа  $k$  М. в. лежат в диапазоне  $\omega \sqrt{c/v} \ll k \ll \sqrt{2\pi} M^2 / A$ , где  $\omega$  — частота М. в.,  $v$  — диэлектрич. проницаемость,  $M$  — намагниченность,  $A$  — параметр обменного взаимодействия. Левое неравенство соответствует условию  $v_\phi \ll c$ , правое — условию безобменного приближения. Для типичных ферромагнетиков диапазон М. в. соответствует волновым числам  $10 \text{ см}^{-1} \ll k \ll 10^6 \text{ см}^{-1}$ . В меру малости фазовой скорости М. в. описываются ур-ниями магнитостатики

$$\text{rot } H = 0, \quad \text{div}(H + 4\pi M) = 0$$

и Ландау — Лифшица уравнением движения магн. моментов

$$\dot{M} = -\gamma [M \cdot H]$$

с магнитостатич. граничными условиями

$$H_\tau, \quad B_n \Big|_r = \text{const},$$

где  $H_\tau$  и  $B_n$  — тангенциальная и нормальная к поверхности образца составляющие напряжённости и индукции магн. поля.

В образце конечных размеров магнитостатич. колебания магн. моментов зависят от формы и размеров образца [Л. Р. Уокер (L. R. Walker, 1957), В. Г. Барьях-

тар и М. И. Каганов (1964)]. В погранич. пластине распространяются как поверхностные, так и объёмные М. в., структура и спектр к-рых зависят от геометрии намагничивания пластины и направления распространения волны [Р. У. Деймон, Дж. Р. Эшбах (R. W. Damon, J. R. Eshbach, 1961)].

Эксперим. и теоретич. изучение М. в. началось в 70-х гг. 20 в. и до 80-х гг. проводилось на объёмных образцах (сферах, стержнях и пластиках) из монокристаллов железоиттриевого граната (ЖИГ) с нач. 80-х гг. М. в. исследуются преим. в оптическиально выращенных плёнках ЖИГ (см. *Эпитаксия*).

М. в. возбуждаются неоднородным магн. полем, создаваемым в феррите током, протекающим по металлу, проводнику, расположенному на поверхности исследуемого образца (плёнки). Для возбуждения и приёма М. в. применяются преобразователи в виде микрополосковых, компланарных и щелевых волноводов линий, выполненных на ферритовом слое.

В отсутствие магнитоотрастала, анизотропии спектр и структура распространяющихся в плёнке М. в. определяются магнитоиндольными взаимодействиями спинов, обусловленными полями рассеяния, возникающими при колебаниях намагниченности в плёнке.

Различают три осн. типа М. в. в плёнке (пластине). При намагничивании плёнки параллельно её плоскости в ней могут распространяться поверхностные (ПМВ) и обратные объёмные (ООМВ) М. в., спектры к-рых

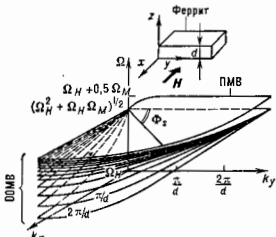


Рис. 1. Спектры магнитостатических волн для случая касательной намагниченной пластины (плёнки). Показана угловая зависимость спектра частот М. в. для одного квадранта системы координат. В этом квадранте спектр поверхностной магнитостатической волны расположен в секторе, ограниченном углом  $\Phi_2$ . Снизу к нему примыкает спектр обратных объёмных магнитостатических волн, имеющих многомодовый состав (Деймон, Эшбах, 1961). Для других квадрантов картина аналогична.

изображены на рис. 1. Поверхностные М. в., часто называемые волнами Деймона — Эшбаха, имеют ограниченный угол сектора распространения, перпендикулярный направлению магн. поля и определяемый углом  $2\Phi_2 = 2 \arctg (H/4\pi M)^{1/2}$ . Их спектр лежит в диапазоне частот

$$(\Omega_H + \Omega_H \Omega_M)^{1/2} < \Omega < \Omega_H + 1/2 \Omega_M,$$

где  $\Omega_H = \gamma H$ ,  $\Omega_M = \gamma \cdot 4\pi M$ ,  $\gamma$  — магнитомеханическое отношение. Эти волны имеют положит. групповую скорость  $v_g = d\Omega/dk > 0$ . Амплитуда ПМВ экспоненциально падает не только снаружи, но и внутри ферритового слоя вглубь от его поверхности, на к-рой локализована волна. Этот тип М. в. обладает неважными свойствами при распространении: волны, движущиеся в прямом и обратном направлении, локализованы на противоположных сторонах плёнки. Набл. сильно неважного распространения ПМВ проявляются при металлизации одной из поверхностей ферритовой

плёнки. Металлизация изменяет граничные условия, т. к. на ней  $B_n = 0$ . Спектральные характеристики М. в., локализованной вблизи металлизированной поверхности и удалённой от неё, отличаются. В частности, верх. граница частот ПМВ, локализованных вблизи металлизированной поверхности, возрастает до  $\omega_\infty = \Omega_H + \Omega_M$ . Поэтому ПМВ, распространяющиеся в прямом и обратном направлениях, в данном случае имеют разл. групповые скорости распространения.

Спектр обратных  $x$  объёмных М. в. в изотропном ферромагнетике примакает к спектру поверхностных М. в. и лежит в диапазоне  $\Omega_H < \Omega < (\Omega_H^2 + \Omega_H \Omega_M)^{1/2}$ . ООМВ имеют многомодовый характер спектра и отрицат. групповую скорость:  $v_g = d\Omega/dk < 0$ . В касательно намагниченной плёнке (пластине) спектр М. в. анизотропен, поэтому направления лучевой и фазовой скоростей в волне в общем случае не совпадают, кроме двух случаев, когда  $H \perp k$  и  $H \parallel k$ . В первом случае спектр ООМВ вырождается в прямую линию  $\Omega = (\Omega_H^2 + \Omega_H \Omega_M)^{1/2}$ , так что при этом  $d\Omega/dk = 0$ , а во втором случае ширина спектра мала.

При перпендикулярном намагничивании плёнки до насыщения в ней распространяются прямые объёмные М. в. (ПОМВ), характеризующиеся многомодовым изотропным спектром (рис. 2). Они имеют положит. групповую скорость, а частотный интервал их спектра лежит в диапазоне  $\Omega_H < \Omega < (\Omega_H^2 + \Omega_H \Omega_M)^{1/2}$ , где  $\Omega_H = \gamma H - 4\pi M$ .

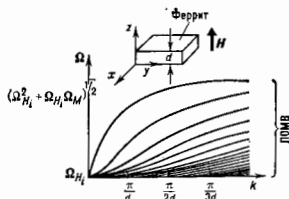


Рис. 2. Спектр прямых объёмных магнитоэстатических волн для случая перпендикулярно намагниченной пластины (плёнки).

Мин. потери энергии распространяющейся М. в. определяются процессами магн. релаксации спинов (магн. моментов) — шириной линии однородного ферромагнитного резонанса  $\Delta H$ . Диссипативные потери учитываются в ур-ниях движения магн. моментов введением соответствующего релаксат. члена в ур-ние Ландау — Лифшица. Декремент пространств. затухания М. в. определяется при этом мнимой частью волнового числа  $\text{Im } k = \delta\Omega/v_g$ , где  $\delta\Omega$  — ширина линии М. в., пропорциональная  $\Delta H$ . Потери М. в. относят обычно к времени групповой задержки сигнала  $\tau_g = -1/v_g$ , где  $L$  — расстояние, пройденное импульсом М. в., так что изменение мощности М. в.  $P(L)$  описывается ф-лой

$$\alpha = \frac{10}{\tau_g} \lg \frac{P(L)}{P(0)} \approx 76,4 \cdot \Delta H \text{ (дБ/мкс.)}$$

В типичных плёнках ЖИГ с шириной линии  $\Delta H = 0,3 \text{ Э}$  затухание М. в.  $\alpha = 15-25 \text{ дБ/мкс.}$  Длинноволновые (безобменные) М. в. взаимодействуют с др. волнами в плёнке, и в первую очередь с коротковолновыми (обменными) спиновыми волнами. Когда толщина  $d$  плёнки достаточно мала,  $d \lesssim \pi(A/M\Delta H)^{1/2}$ , М. в. могут являться источником возбуждения стоячих (поперёк плёнки) коротковолновых

спиновых колебаний — мод спин-волнового резонанса (СВР). Взаимодействие М. в. с модами СВР в этом случае изменяет их дисперсионные и амплитудно-частотные характеристики. В области пересечения частотных ветвей М. в. и СВР происходит гибридизация спиновых волн, в результате к-рой групповая скорость М. в. уменьшается, а декремент пространств. затухания её увеличивается. Наиб. интенсивно М. в. возбуждает СВР при наличии поверхностного «загрязнения» спинов, магн. и др. пространств. неоднородностей в ферритном слое.

Благодаря магнитоэстатическим М. в. взаимодействует с акустич. волнами, наиб. сильно — в области магнитоэстатического резонанса, когда образуются связанные магнитоупругие волны. Вдали от магнито-

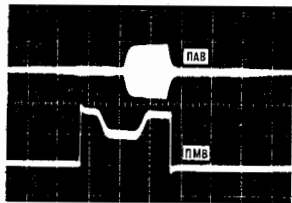


Рис. 3. Осциллограмма импульса поверхностной магнитоэстатической волны, рассеянной на поверхностных акустических волнах. Амплитуда проходящего после рассеяния импульса поверхностной магнитоэстатической волны (испытывающей брэгговское отражение) уменьшается (пропадает в середине осциллограммы) импульса поверхностной магнитоэстатической волны).

тоакустич. резонанса волна упругой деформации также может сильно изменить амплитудно-частотные характеристики М. в. как при коллинеарной, так и при неколлинеарной геометрии их взаимного распространения (при выполнении условий неупругого рассеяния М. в. на акустич. волне). На рис. 3 показан эффект уменьшения амплитуды импульса М. в. при коллинеарном рассеянии её на поверхностной акустич. волне (ПВВ; импульс её изображён сверху).

Мощность М. в. ограничена сверху. Она пропорциональна квадрату угла  $\theta$  отклонения прецессирующей магн. момента от равновесного положения. Макс. амплитуда прецессии (а следовательно, мощность М. в.) ограничивается распадающимися спин-волновыми процессами — параметрич. генерацией высочастотных спиновых волн за счёт энергии М. в. При достижении пороговой мощности М. в. амплитуда прецессии практически не увеличивается, т. к. энергия М. в. идёт на поддержание параметрически возбуждённого состояния спиновой системы кристалла. При небольших значениях внеш. магн. поля [ $H < (4\pi/3)M$ ] амплитуду поверхностных М. в. ограничивают в основном трёхмагнитонные распады (генерация трёх мод спин-волновых колебаний). При этом макс. величина угла отклонения  $\theta_{\text{макс}} \approx \Delta H/(4\pi M)$ . Когда  $H > (4\pi/3)M$ , то для трёхмагнитонных распадов не могут выполняться условия фазового синхронизма взаимодействующих волн (закон сохранения энергии и импульса) и преобладающими становятся четырёхмагнитонные спин-волновые процессы, к-рые ограничивают угол отклонения величиной  $\theta_{\text{макс}} \approx \sqrt{\Delta H/(4\pi M)}$ .

Перспективная область применения М. в. — устройства аналоговой обработки сигналов микроволнового диапазона (0,5–20 ГГц), аналогичные акустоэлектронным устройствам на поверхностных акустич. волнах (см. Акустоэлектроника). Это связано с тем, что при частотах выше 3 ГГц М. в. в ЖИГ затухают слабее, чем

ПАВ в природе лития. Кроме того, благодаря зависимости частоты  $M$  в. от внеш. магн. поля, устройства на  $M$  в. допускают электронное управление амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) микроволновых сигналов, а также превосходят устройства на ПАВ менее жесткими требованиями к размерам возбуждающих и принимающих устройств.

Для фильтрации, изменения фазовых и амплитудно-частотных характеристик микроволновых сигналов в устройствах на  $M$  в. применяют периодич. решетки в виде металлизиров. полосок, прогаренных канавок, ново-имплантированных структур, на  $K$ -рых  $M$  в. отражаются в соответствии с условиями *Брэгговского отражения*. Для тех же целей применяют многослойные сварные структуры (феррит — диэлектрик — металл, феррит — диэлектрик — феррит и др.), изменяющие АЧХ  $M$  в. в зависимости от типа структуры и толщины составляющих слоев.

Дисперсионные характеристики  $M$  в. измеряются по времени задержки импульсов  $M$  в. в зависимости от частоты и внеш. магн. поля. Для измерения спектральных зависимостей  $M$  в. используют интерференцию сигналов быстрой эл.-магн. волны наводки и принимаемой  $M$  в. Для диагностики  $M$  в. применяют индукц. и магнитоопт. методы зондирования, основанные на эффекте *Мандельштама — Бреллоуна* рассеяния света на  $M$  в. Спектральные и амплитудно-частотные характеристики  $M$  в. используются для измерения параметров магн. релаксации, анализа данных ферромагн. резонанса, определения степени «защелкивания» спинов на поверхности, магн. однородности сварных структур и др. величин.

Лит.: Walker L. R., Magnetoelastic modes in ferromagnetic resonance, «Phys. Rev.», 1957, т. 105, п. 390; Барьяхтар В. Г., Каганов М. И., Неодорожный резонанс и спиновые волны в об.: Ферромагнитный резонанс, под ред. С. В. Вонсоцкого, М., 1961; Damon R. W., Eshbaeh J. R., Magnetoelastic modes of a ferromagnetic slab, «J. Phys. Chem. Solids», 1961, v. 19, № 3/4, p. 308; Гуревич А. Г., Магнитный резонанс в ферритах и антиферритах, М., 1973, с. 322; Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Взаимодействие СВЧ-спиновых волн и электронов в слоистых структурах полупроводник-феррит, «Радиотехника и электроника», 1978, т. 23, в. 3, с. 397; Лавров Б. М., Ловати В. И., Магнитоэлектрические колебания в ферритах и их использование в технике СВЧ, «Обзоры по электронной технике. Сер. 1 — Электроника СВЧ», 1978, в. 12; Вап и з Г. М., СВЧ-устройства на магнитоэлектрических волнах, там же, 1984, в. 3, с. 61; Зильберман А. К., Полюков А. Ф., Магнитоэлектрические волны в электронике, в кн.: Итоги науки и техники, сер. Электроника, т. 19, М., 1987. А. Ф. Полюков.

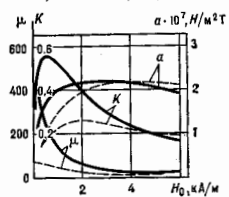
**МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ** — ферромагнитные металлы и сплавы (см. *Ферромагнетик*) и ферритмагнитные ферриты, обладающие хорошо выраженными магнитоэлектрич. свойствами (см. *Магнитоэлектрик*); применяются для изготовления *магнитоэлектрических преобразователей*. Существуют металлы, и ферритные  $M$  в.

Свойства  $M$  в. Связанные с преобразованием энергии свойства  $M$  в. характеризуются коэф. магнитоэлектрич. связи  $K$ , магнитоэлектрич. постоянной  $a$  и постоянной чувствительности  $A$ . Величина  $K$  равна отношению преобразованной энергии (механической или магнитной) к подводимой (соответственно магнитной или механической) без учета потерь;  $a = \sigma_m B_m$  определяет чувствительность электромеханич. преобразователя в режиме излучения, а  $\Lambda = B_m \sigma_m$  — его чувствительность в режиме приема. Относит. магн. проницаемость  $\mu = B_m / H_m$  характеризует электрич. импеданс преобразователя в отсутствие механич. колебаний,  $K$ -рый необходимо учитывать при согласовании преобразователя с электрич. схемой ( $\sigma_m, B_m, H_m$  — соответственно амплитуды механич. напряжения, магн. индукция, магн. поля). Величины  $a, \Lambda, K$  связаны соотношениями, в  $K$ -рые входят магн. проницаемость  $\mu$  (в общем случае комплексная) и константа упругой податливости. Динамич. постоянные упругости — модуль Юнга и модуль сдвига — в комбинации с плотностью материала определяют скорость продольных и сдвиговых волн и соот-

ветственно резонансные частоты сердечников заданных размеров при заданной форме колебаний.

Эффективность преобразования, или КПД, определяется наряду с коэф.  $K$  магн. и механич. потерями. Магн. потери в  $M$  в. обусловлены вихревыми токами, зависящими от уд. электрич. сопротивления  $\rho$ , и *гистерезисом магнитным*, косвенно определяемым величиной коэрцитивной силы  $H_c$ . Характеризуются магн. потери величиной  $I_{\text{гф}}$ , представляющей отношение вымощи и действит. части  $\mu$ . Механич. потери зависят от добротности материала  $Q$ .

Динамич. характеристики  $M$  в. сильно зависят от величины пост. поля подмагничивания  $H_0$  (рис.). В таблице приведены динамич. характеристики основных  $M$  в., отвечающие малым амплитудам  $H_m \ll H_0$ .



Температурная стабильность свойств  $M$  в., особенно важная при использовании их в фильтрах, стабилизаторах час-

Зависимости  $K, a, \mu$  от подполя подмагничивания  $H_0$  для никели (зигзаги) и феррита (сплошная линия) при малой амплитуде переменного поля.

тоты и др., тем больше, чем выше температура Кюри  $T_c$ . Для магнитоэлектрич. излучателей звука большое значение имеют величина магнитоэлектрич. напряжения  $\lambda_s$ ,  $K$ -рая определяет их предельную мощность в условиях значит. нагрузки, и динамич. устойчивость прочност.  $\sigma_{\text{пр}}$ , ограничивающая предельную амплитуду колебаний слабо нагруженных преобразователей. Величина  $\lambda_s$ , а также крутизна статич. кривой зависимости магнитоэлектрич. от магн. поля являются определяющими параметрами  $M$  в. при их использовании в оптико-механич. системах, создающих управляемые статич. или НЧ-перемещения.

Из металлических  $M$  в. наиб. употребительны никель и сплавы на его основе, а также железокобальтовые и железоалюминиевые сплавы. Их используют в поликристаллич. форме и изготавливают по обычной металлургич. технологии, прокатывая в виде полос толщиной 0,1—0,3 мм для уменьшения потерь на вихревые токи. В сплавах на основе никеля, напр. введенном добавок кобальта, компенсируют магнитоэлектрич. анизотропию и соответственно повышают динамич. характеристики  $K, a, \mu$ , а также снижают потери на гистерезис, добавки же кремния или хрома повышают  $\rho$  и соответственно уменьшают потери на вихревые токи. Созданием кристаллич. ориентации в никеле и его сплавах (т. е. кристаллографич. текстуры) достигается увеличение  $\lambda_s$  на 20—30%. Железокобальтовый сплав — пермаллой — обладает большей  $\lambda_s$  и более высокими магн. и магнитоэлектрич. константами, чем никель, благодаря чему он применяется в мощных излучателях звука. Однако этот сплав легко корродирует, отличается невысокой временной и технол. стабильностью свойств, непластичен и поэтому неудобен в обработке. Железоалюминиевые сплавы обладают достаточно высокими магнитоэлектрич. характеристиками и электропрочностью; их недостаток — низкая коррозионная стойкость, повыш. хрупкость, затрудняющая их механич. обработку. Электромеханич. и электроакустич. преобразователи из металлов.  $M$  в. применяют на частотах до 20—40 кГц, практически без ограничения прочности.

Редкоземельные  $M$  в. Особую группу металлов.  $M$  в. составляют материалы на основе соединений редкоземельных элементов (тербия (Tb), диспрозия (Dy)) с железом. Магнитоэлектрич. их очень велика — до

$10^{-9}$ — $10^{-2}$ , однако она достигается в магн. полях, состоящих из десятков и сотен кА/м. Введение компонентов, компонирующих кристаллографич. анизотропию, и создание текстуры позволяют увеличить крутизну магнитострикц. кривой и соответственно повысить динамич. характеристики материалов этого типа: у лучших составов величина  $K$  достигает 0,80 при  $H_0 \approx 10$  кА/м. Получают образцы сплавов на основе редкоземельных элементов методом вытягивания из расплава или методами порошковой металлургии.

**Ферритовые М. п.** К ним относятся ферриты со структурой шпиннели — феррит никеля и твёрдые растворы на его основе (включающие ферриты кобальта, цинка, меди и др. добавки) — и со структурой гравата — в основном феррит-гранат иттрия (ИФГ). Ферриты-шпиннели употребляют в виде поликристаллич. керамики, к-рая изготавливается из оксидов (реже солей) металлов по керамич. технологии, в форме монокристаллич. сердечников; ферриты-граваты выращивают из расплава в виде монокристаллов.

Ферритовые М. п. практически не обладают потерями на вихревые токи и соответственно могут использоваться до весьма высоких частот. Для электроакустики, преобразователей применяют ферриты-шпиннели на основе феррита никеля, к-рые обладают достаточно хорошими константами преобразования, высокой механич. добротностью, коррозионной стойкостью. Однако относительно малая механич. прочность и низкие значения  $\lambda$ , этих М. п. ограничивают предельную амплитуду излучателя звука из ферритов. Для использования в электроакустике, фильтрах, резонаторах путём модификации хим. состава созданы образцы керамич. ферритов с добротностью св. 5000 и весьма малыми температурными коэф. резонансной частоты сердечников. Они применяются на частотах от  $10^4$  до  $10^6$  Гц. В диапазоне  $10^7$ — $10^8$  Гц для устройств акустоэлектроники используются монокристаллич. ферриты-граваты на основе редкоземельных элементов, обладающие малыми магн. потерями и высокой механич. добротностью. Наиб. распространение среди них получил феррит-гранат иттрия, у к-рого  $Q \approx 10^4$  на частоте 10 МГц,  $t_{\text{в}} \approx 0,03$  на частоте 20 МГц, а  $T_c = 640^\circ\text{C}$ . Кристаллы ИФГ используются для линий задержки, в т. ч. с усилением сигналов на основе использования нелинейных эффектов и с взаимодействием акустич. и спиновых волн (см. *Магнитоупругие волны*).

Лит.: Попов И. Я., Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов, 2 изд., Л., 1971; Штраус В., Магнитоупругие свойства иттриевого феррита-гравата, в кн.: Физическая акустика, под ред. У. Мелона, пер. с англ., т. 4, ч. В, С. М., 1970; Сыркин Л. Н., Пьезомагнитная керамика, 2 изд., Л., 1980; Саваге Н. Т. и др., *Резонансные магнетомеханические линии и магнетострикция в grain-oriented rare earth — iron alloys*, *J. Appl. Phys.*, 1979, в. 50, № 3, стр. 1674; Денис А., Электроакустические системы, пер. с нем., М., 1982.

### МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

— электроакустич. или электроакустический преобразователь, действие к-рого основано на эффекте магнитоакустики. В М. п. используется, как правило, линейная магнитоакустика ферро- или ферритмагнети-

ков в области техн. намагничивания (см. *Ферромагнетизм, Ферритмагнетизм*).

М. п. представляет собой сердечник из магнитоакустич. материала с обмоткой. Протекающий по обмотке М. п. переменный ток от внеш. источника создаёт в сердечнике переменное магн. поле (намагниченность), к-рое вызывает его механич. колебания. И наоборот, колебания сердечника М. п. под действием внеш. переменной силы преобразуются в переменную намагниченность, наводящую в обмотке переменную эдс. Электрич. импеданс обмотки М. п. в областях частот, лежащих вблизи собств. частот колебаний сердечника, в значит. степени определяется механич. параметрами сердечника, рассматриваемого как колебат. система. В соответствии с этими свойствами М. п. используют в УЗ-технике, гидроакустике, акустоэлектронике и ряде др. областей техники в качестве излучателей и приёмников звука, разнообразных датчиков колебаний, фильтров, резонаторов, стабилизаторов частоты и др.

Материалом для сердечников М. п. — излучателей и приёмников звука — в гидроакустике и УЗ-технике служат металлы, магнитоакустич. материалы: никель и его сплавы, железокобальтовые и железоалюминиевые сплавы и керамика, магнитоакустич. материалы на основе феррита никеля. Работают такие М. п. на частотах от неск. сотен Гц до десятков кГц; частотный диапазон ограничивается сверху у металлов, материалов потерями на вихревые токи, а также необходимостью создания сердечников с замкнутым магн. потоком для уменьшения потерь из-за расстояния. Для фильтров, резонаторов и др. устройств акустоэлектроники применяют, как правило, лишь ферритовые материалы ввиду их высокой механич. добротности и (у некр-рых составов) температурной стабильности свойств. В диапазоне десятков и сотен кГц в акустоэлектронике используются ферриты-шпиннели в керамич. модификации на основе никелевого феррита, на частотах до сотен МГц — кристаллич. ферриты-граваты на основе редкоземельных элементов.

В большинстве случаев М. п. работают при наличии постоянной составляющей магн. поля  $H_0$  (магн. индукция  $B_0$ ) с целью линеаризации эффекта магнитоакустики: при этом колебания сердечника в режиме излучения происходят с частотой возбуждающего поля, а в режиме приёма эдс в обмотке имеет частоту внеш. звукового давления. Пост. подмагничивание создаётся либо протекающим по обмотке пост. током, либо с помощью пост. магнитов, либо за счёт остаточной намагниченности. В излучателях звука величину  $H_0$  выбирают так, чтобы получить макс. эффект преобразования энергии или достичь предельной излучаемой мощности (в последнем случае  $B_0 \approx B_{\text{в}}/2$ , где  $B_{\text{в}}$  — индукция насыщения). В приёмниках достаточной бывает остаточная намагниченность, при к-рой чувствительность ближе к макс. значению. В устройствах акустоэлектроники — фильтрах, стабилизаторах, линиях задержки — пост. поле используют иногда и для управления их характеристиками — коэф. передачи, величиной потерь, ра-

Основные характеристики магнитоакустических материалов

Материал, его марка	Хим. состав	$d$ , $10^{-10}$ Гц/м <sup>2</sup>	$c$ , м/с	$\nu$	$K$	$d$ , $10^{-10}$ Гц/мТ	$H_{\text{звч}}^{100}$ , А/м	$\lambda$ , $10^{-4}$	$D$ , $10^{-10}$ Ом·см	$H_c$ , $10^{-10}$ А/м	$Q$	$\delta_{\text{вп}}^{100}$ , м <sup>2</sup>	$T_c$ , °C
Никель													
НИ2Т	Ni > 98%	8,5	4900	35	0,25—0,30	2,3	10—20	—37	0,7	1,7	700	1000	360
Пермелдор, 4КФ	Co 49%, V2%, ост. Fe	8,2	5200	200	0,50	2,2	4—6	+70	3,4	1,4	600	1100	980
Альфери, 12Ю	Al 12—14%, ост. Fe	6,7	4800—5000	30—100	0,25—0,30	0,85—1,15	3—7	+40	16	0,12—0,30	400	—	500—800
Феррит, 21СИА	NiOFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> +глаувер	5,2	5900	20	0,25	2,6	15—20	—26	10 <sup>7</sup>	2—4	2000	200—250	590
Ферриты Виброне	NiOFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> +Cu, Co	5,1	5600	20	0,27	2,0	10—17	—30	10 <sup>7</sup>	—	2000	150	530

бочей частотой. М. п. используются обычно в режиме резонансных колебаний сердечника, вне резонанса применяются иногда лишь датчики колебаний.

М. п., используемые в гидроакустику или УЗ-технике для излучения и приёма звука или в качестве датчиков колебаний, имеют чаще всего сердечники стержневого или кольцевого (цилиндрич.) типа (рис. 1). Стержневые сердечники совершают продольные колебания вдоль

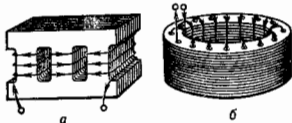


Рис. 1. Преобразователи из металлических магнито-стрикционных материалов с сердечниками: а — стержневой, б и в — кольцевой формы. Стрелками отмечено направление тока в обмотке.

оси составляющих их двух или более стержней. Стержни объединяются т. н. накладками, к-рые обеспечивают замыкание магн. потока и непосредственно излучают (принимают) звуковые волны или колебания. При одностороннем излучении (приёме) со стороны перерабатываемой поверхности создают экран — воздушную подушку (напр., с помощью пористой резины). Кольцевые М. п. в зависимости от расположения экрана излучают звук внутр. или наружной поверхности. В первом случае М. п. может работать как фокусирующий; используется также резонанс внутр. полости, когда собственно излучателем является столб жидкости внутри цилиндра. Во втором случае осуществляется излучение во внеш. среду с равномерной азимутальной характеристикой направленности в плоскости, перпендикулярной оси. Сердечники из металла, материалов для уменьшения потерь на вихревые токи набирают из штампованных по их форме тонких (0,1—0,2 мм) пластин (рис. 1, а и б) или навивают из тонкой ленты (рис. 1, в). Сердечники излучателей и приёмников из ферритов используют молотитыми ввиду большого электросопротивления этих материалов и обычно — с вост. магнитами (рис. 2).

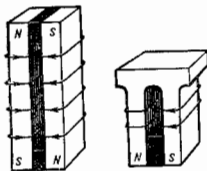


Рис. 2. Ферритовые преобразователи с вставленными в молотитый сердечник постоянными магнитами (зачернены).

торах и др. устройствах имеют форму колец, стержней, гантелей, трубок, причём широко используются как продольные (рис. 3, а), так и крутильные колебания. Крутильные колебания возбуждаются на основе Видемана эффекта: в трубке с вост. остаточной намагниченностью вдоль оси ток в тороидальной обмотке создаёт переменное циркулярное магн. поле (рис. 3, б) или при остаточной циркулярной намагниченности ток в соленоидальной, соосной с сердечником, обмотке создаёт осевое переменное поле (рис. 3, в).

Резонансные частоты  $f_0$  сердечников в виде стержней сеч. сечения или тонких трубок вычисляются по ф-лам  $f_0 = (n/2l)\sqrt{E/\rho}$  для продольных и  $f_0 = (n/2l)\sqrt{G/\rho}$  для крутильных колебаний, где  $n$  — номер гармоника,

$l$  — длина стержня (трубки),  $E$  — модуль Юнга,  $G$  — модуль сдвига,  $\rho$  — плотность материала сердечника. Резонансная частота радиальных колебаний кольца или цилиндра со ср. радиусом  $r_0$  приближённо определяется ф-лой  $f_0 = (1/2\pi r_0)\sqrt{E/\rho}$ . В зависимости от режима работы, обусловленного нагрузкой в электр. цепи М. п., в ф-лах для резонансных частот будут фигурировать модули упругости  $E^H$  и  $G^H$  (при пост. поле) или

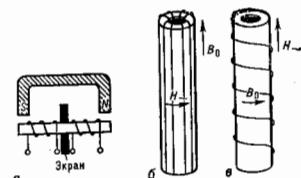


Рис. 3. Магнито-стрикционные резонаторы, работающие: а — на продольных, б и в — на крутильных колебаниях.

$E^B$  и  $G^B$  (при пост. индукции), или же промежуточные между этими крайними величинами значения модулей. Излучатели из металл. материалов обладают электроакустич. кпд 50%, из ферритов — до 70—80%. Интенсивность  $I$  излучения их на резонансной частоте определяется выражением

$$I = \frac{\alpha^2 B_m^2}{\Gamma_m} n_{Ma}^2 \Psi,$$

где  $\alpha$  — магнито-стрикц. постоянная,  $B_m$  — амплитуда переменной индукции,  $\Gamma_m$  — уд. механ. сопротивление акустич. нагрузки,  $n_{Ma}$  — механоакустич. кпд,  $\Psi$  — безразмерная величина, зависящая от формы сердечника. Макс. интенсивность излучения М. п. при работе на значит. нагрузку (напр., при излучении в жидкость в отсутствие кавитации или в твёрдое тело) ограничивается нелинейностью свойств материала сердечника, обусловленной явлением магн. насыщения, и достигает десятков Вт/см<sup>2</sup> (у ферритовых излучателей — не более 10 Вт/см<sup>2</sup>). При работе с малой нагрузкой (напр., в составе УЗ-инструментов) ограничивающим фактором является механич. прочность материала. Амплитуда колебаний стержневых излучателей на частотах 20—40 МГц может достигать св. 10 мкм (у ферритовых — 2—3 мкм).

Высокая механич. прочность, отсутствие спец. требований к гидро- и электроизоляции сердечника — гл. достоинства М. п., определяющие в ряде случаев их преимущество перед пьезоэлектрич. преобразователями в диапазоне частот от сотен Гц до 100 кГц для целей гидроакустики и УЗ-техники. При использовании М. п. в устройствах акустоэлектронной осн. достоинством их является высокая механич. добротность, достигающая у ферритовых резонаторов величин  $\sim 10^4$  [М. п. на основе феррита-граната итрия (ИФГ) обладают добротностью до  $10^7$  в акустич. СВЧ-диапазоне]; при этом устройства на основе М. п. отличаются от простотой изготовления и удобством схемных решений.

Лит.: Физическая акустика, под ред. У. Мэсона, пер. с англ., т. 1, ч. А. М., 1966; Голд и м и н и И. П., Магнито-стрикционные излучатели из ферритов, в кн. Физика и техника мощного ультразвука, изд. 1 — Источники мощного ультразвука, М., 1967; Ультразвуковые преобразователи, под ред. Е. Киничи, пер. с англ., М., 1972; Г у т и Л. Я., Изобр. труды, 11, 1977, И. С. Голышев.

**МАГНИТОСТРИКЦИЯ** (от лат. *strictio* — сжатие, натягивание), изменение формы и размеров тела при его намагничивании; открыто в железе Дж. П. Джоулем (J. P. Joule, 1842). Явление М. свойственно всем веществам как сильномагнитным (ферро-, ферри- и антиферромагнетикам), так и диа- и парамагнетикам, поскольку отражает взаимосвязь подсе-

тем атомных магнитных моментов и кристаллической решетки. В сальвомагн. веществах  $M$  достигает значит. величин (относит. удлинение  $\Delta l/l \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ ). В диа- и парамагнетиках в большинстве случаев  $M$  мала ( $10^{-3} - 10^{-6}$ ), но имеются исключения:  $V$  и редкоземельные парамагнетики, в  $K$ -рых она достигает  $10^{-4}$ . Существует ряд родственных  $M$  явлений: спонтанная деформация решетки, или спонтанная  $M$ , сопутствующая изменению магн. состояния вещества при нагреве (иногда её наз. термострикция); часть упругой деформации магнитоэлектрич. природы, возникающей при действии механич. напряжений (механоэлектрич.); обратное по отношению к  $M$  явление — изменение намагниченности магнетика при действии на него механич. напряжений (магнитоупругий эффект, или обратная  $M$ ).

В теории магнетизма рассматриваются разл. микроскопич. механизмы  $M$ : за счёт изменения магн. диполь-дипольного взаимодействия, спин-орбитального взаимодействия, а также взаимодействия анизотропного электронного облака атома переходного элемента с внутрискристаллическим полем (одноионная  $M$ ) и за счёт изменения обменных сил как между атомами, так и между электронами. В ферро- и ферримагнетиках в диапазоне значений магн. поля, где протекают процессы смещения доменных границ и вращение векторов  $M$ , спонтанной намагниченности (см. *Намагничивание*), проявляется анизотропия  $M$  — зависимость её величины и знака от направления в кристалле, при этом  $M$  проявляется в изменении формы кристалла без изменения его объёма (длина  $l$  и  $l_0$ ). Расчёты линейной  $M$  в кристаллах осуществляются по феноменологич. ф-лам. Так, для расчёта  $M$  ферро- и ферримагн. кристаллов кубич. симметрии, намагниченных до насыщения, применяется ф-ла

$$(\Delta l/l)_s = a_1 \sum_{i,j} (\delta_{ij}^2 - 1/3) + 2a_2 \sum_{i,j} s_i s_j \beta_i \beta_j,$$

где  $s_i, s_j$  и  $\beta_i, \beta_j$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) — направляющие косинусы векторов  $M_s$  и направления измерения по отношению к ребрам куба,  $a_1$  и  $a_2$  — константы анизотропии  $M$ , числовые равные:

$$a_1 = 3/2(\Delta l/l)_{[100]}, \quad a_2 = 3/2(\Delta l/l)_{[111]},$$

где  $(\Delta l/l)_{[100]}$  и  $(\Delta l/l)_{[111]}$  — макс. линейные  $M$  соответственно вдоль ребра и пространств. диагоналя куба. Для ферро- и ферримагнетиков иной кристаллич. симметрии ф-лы для расчёта анизотропии  $M$  носят более сложный характер. Путём усреднения по различным  $s_i, s_j, \beta_i$  и  $\beta_j$  может быть получена ф-ла для расчёта  $M$  поликристаллич. образцов (при условии, что  $a_1$  и  $a_2$  одного знака и близки друг другу по величине). Так, для  $Ni$  и сплавов  $Fe - Ni$  применима ф-ла

$$(\Delta l/l)_s = 3/2(\Delta l/l)_{[100]}(\cos^2 \nu - 1/3),$$

где  $\nu$  — угол между направлением напряжённости магн. поля  $H$  и направлением измерения линейной  $M$  внутри поликристаллич. образца. Обычно  $M$  измеряют вдоль направления  $H$  ( $\nu = 0$ ) и поперёк  $H$  ( $\nu = 90^\circ$ ), т. е. определяют значения продольной  $(\Delta l/l)_s$  и поперечной  $(\Delta l/l)_p$ . Для большинства ферромагнетиков они имеют разные знаки.

В области парапроцесса в кубич. ферромагнетиках  $M$  проявляется в изменении объёма (объёмная  $M$ ), иногда её наз. обменной  $M$ , поскольку она обусловлена изменением обменного взаимодействия и обычно велика вблизи Кюри точки. Здесь её зависимость от  $H$  может быть рассчитана по феноменологич. ф-лам, вытекающим из термодинам. теории фазовых переходов Ландау или теории молекулярного поля. Власти от точки Кюри для большинства ферромагнетиков  $M$  парапроцесса мала. Однако в т. н. зонных ферромагнетиках (см. *Зонный магнетизм*) она очень велика, даже при

гелиевых темп-рах. Большая  $M$  парапроцесса характерна для ферро- и ферримагнетиков при разрушении полем  $H$  существующих в них неколлинеарных магн. структур, т. к. при этом сильно изменяется обменная энергия.

$M$  относится к т. н. чётным магн. эффектам, т. к. не изменяет своей величины и знака при изменении направления поля  $H$  (или вектора  $M_s$ ) на противоположное. В пьезомагнетиках (см. *Пьезомагнетизм*) наб-

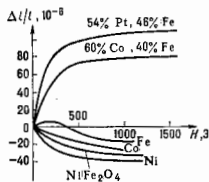


Рис. 1. Зависимость относительной магнитоэлектрической величины  $(\Delta l/l)$  от напряжённости магнитного поля  $H$  ( $H$  — в  $10^6$  А/э) для ряда металлов, их соединений и сплавов.

людается  $M$ , линейная по магн. полю.  $M$  исследована во многих поли- и монокристаллич. образцах ферро- и ферримагнетиков. У  $Fe$  (рис. 1) продольная  $M$  в слабом магн. поле положительна (удлинение тела), а в более сильном поле отрицательна (укорочение). Для  $Ni$  при всех значениях поля продольная  $M$  отрицательна. Большинство сплавов:  $Fe - Ni$ ,  $Fe - Co$ ,  $Fe - Pt$  и др. имеют положит. продольную  $M$ :  $(\Delta l/l)_s \sim (10 - 100) \cdot 10^{-6}$ , в то же время в них поперечная  $M$  отрицательна. Для сплавов  $Fe - Ni$  т. н. инвариного состава (30—45%  $Ni$ ) при комнатных и даже высоких темп-рах продольная и поперечная  $M$  в полях  $H > H_s$  (область прозрачности) имеют одинаковые положит. знаки (рис. 2), здесь  $M$  выражается в изменении объёма. Необычайно высоки  $M$  у нек-рых редкоземельных ме-

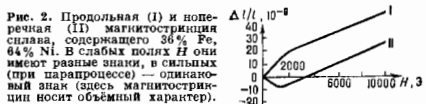


Рис. 2. Продольная (I) и поперечная (II) магнитоэлектрическая величина, содержащего 56%  $Fe$ , 44%  $Ni$ . В слабых полях  $H$  они имеют разные знаки, в сильных (при парапроцессе) — одинаковые (здесь магнитоэлектрицизм носит объёмный характер).

таллов, их сплавов и соединений: у  $Tb$  и  $Dy$ ,  $TbFe_2$  и  $DyFe_2$ , феррита-граната  $Tb_2Fe_5O_{12}$  и др. (т. н. гигантская  $M$ ). В табл. приведены данные о  $M$  в полях магн. насыщения редкоземельных магнетиков и для сопоставления — значения  $M$  для  $Fe$ ,  $Ni$  и  $Co$ .

Магнетик	$(\Delta l/l)_s$ , $10^{-6}$	Темп-ра измерения, К	Кристаллич. ось
Tb . . . . .	1230	78	поликристалл
Dy . . . . .	1400	78	поликристалл
Tb . . . . .	5460	4,2	$H \parallel a$ -ось
Tb . . . . .	2200	4,2	$H \parallel c$ -ось
TbFe <sub>2</sub> . . . . .	4700	300	$H \parallel [111]$
Tb <sub>2</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub> . . . . .	2480	4,2	$H \parallel [111]$
Fe . . . . .	-10	300	поликристалл
Ni . . . . .	-37	300	поликристалл
Ni . . . . .	-60	78	$H \parallel [111]$
Co . . . . .	-71	300	поликристалл

Гигантская  $M$  обнаружена у ряда соединений урана ( $U_2As_2$ ,  $U_2P_4$ ) и др. актинидов. Микроскопич. природа огромной  $M$  редкоземельных и актинидных магнетиков связана с сильным взаимодействием пространственно-анизотропного облака  $f$ -электронов атомов с внутрискристаллич. полем.

Исследование  $M$ , особенно в области техни. намагничивания, помогает в поисках новых магнитных



материалов. Так, высокая магн. проницаемость сплавов титана пераллоид связана с тем, что в них мала энергия магнитоупругой анизотропии вследствие малой величины  $M$  (наряду с малым значением константы магн. кристаллографич. анизотропии). Эффект спонтанной  $M$  влияет на тепловое расширение ферро- и антиферромагнетиков, приводит в ряде случаев к компенсации его или к аномально малому коэф. теплового расширения (инвар-эффект). Большие аномалии модулей упругости, возникающие в некоторых ферро- и антиферромагн. сплавах (эливиарах) за счёт влияния спонтанной  $M$ , приводит к малым значениям температурных коэф. их модулей упругости. Кроме того, при воздействии на ферромагнетики упругих напряжений в них даже при отсутствии внеш. магн. поля происходит перераспределение магн. моментов доменов (в ряде случаев изменяется и абс. величина  $M_s$  домена), что приводит к изменению модулей упругости (явление механострикции).

В непосредств. связи с механострикцией находится изменение под влиянием внеш. магн. поля модуля упругости ферро-, ферри- и антиферромагн. тел ( $\Delta E$ -эффект).  $M$  является очень чувствительным индикатором к разл. магн. процессам и магнитным фазовым переходам, и поэтому её измерения широко используются при магн. исследованиях.

Для измерения  $M$  применяют установки, работающие по принципу механооптич. рычага, позволяющие наблюдать относит. изменения длины образца  $\sim 10^{-6}$ . Ещё большую чувствительность дают радиотехн. и интерференц. методы. Распространён также метод проволочных датчиков, в к-ром на образец наклеивают проволочку (с большим уд. сопротивлением), включённую в одно из плеч измерит. моста. Применяются также разл. методики измерения динамич.  $M$  (в переменных магн. полях).

На влиянии  $M$  основано действие магнитострикц. преобразователей: излучателей и приёмников звука, фильтров, стабилизаторов частот, линий задержки в радиотехн. и акустич. устройствах, устройств микроперемещений, реле и др. Для этого применяются магнитострикц. материалы с разл. параметрами.

Лит.: Белов К. П., Уружие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках, 12 изд., М., 1957; е то же же, Магнитоэлектрические явления и их технические приложения, М., 1987; Вонсовский С. В., Магнетизм, М., 1971.

К. П. Белов.

**МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ** — область околоземного пространства, занятая геомагн. полем; в первом приближении полесть в потоке солнечного ветра (СВ).

#### Общая структура М. З.

Граница М. З. Внеш. границей М. З. является магнитопауза (рис. 1), отделяющая геомагн. поле от обтекающего Землю СВ. Положение магнитопаузы определяется равновесием динамич. давления СВ  $k\rho V^2$  и давления геомагн. поля  $(1/8\pi)(2fM_{\oplus}^2/D_{\oplus}^2)^2$ , где  $\rho$  и  $V$  — плотность и скорость СВ,  $M_{\oplus}$  — магн. момент геомагн. диполя, коэф.  $k$  зависит от характера взаимодействия СВ с М. З. и равен 2 при упругом отражении, коэф.  $f$  характеризует усиление магн. поля в подсолнечной точке магнитопаузы (точка на прямой, соединяющей центры Земли и Солнца) в связи с отличием формы магнитопаузы от плоскости (согласно расчётам,  $f \approx 1,22$ ),  $D_{\oplus}$  — геоцентрич. расстояние магнитопаузы в подсолнечной точке (радиус Чепмена — Ферраро). Магн. поле на магнитопаузе  $\sim 10^{-8}$  Гс, т. е. значительно больше поля невозмущённого геомагн. диполя. Дополнит. поле создается токами, текущими по магнитопаузе и экранирующими магн. переходный слой (см. ниже) от проникновения в него геомагн. поля. Токи на магнитопаузе создаются плазмой СВ: при проникновении в магнитопаузу положит. ионы отклоняются геомагн. полем к западу, а электроны к востоку.

Обтекание М. З. солнечным ветром. Сверхзвуковой и сверххальвеновский СВ, налетая на препятствие — М. З., резко тормозится, образуя бесстолкновит. головную ударную волну (на рис. 1 показана ближайшей к Солнцу поверхностью.) Подсолнеч-

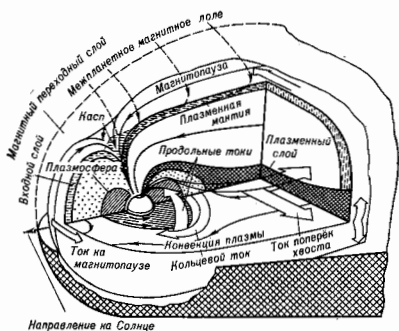


Рис. 1. Пространственное распределение плазмы, магнитных полей и электрических токов в магнитосфере Земли. Светлыми широкими стрелками показаны токи на магнитопаузе и в плазменном слое, кольцевой и продольные токи. Тёмные стрелки указывают направление вращения плазмосферы совместно с Землей. Показаны также направления конвекции в хвосте магнитосферы. Точками отмечена область кольцевого тока.

ная точка фронта головной ударной волны распространяется на геоцентрич. расстоянии  $\approx 13 R_{\oplus}$  ( $R_{\oplus}$  — радиус Земли). На фронте головной ударной волны происходит изменение направления движения частиц СВ. Их направленная скорость уменьшается, а тепловая скорость растёт так, что плазма между фронтом ударной волны и магнитопаузой нагревается до неск. миллионов градусов. Эта разогретая плазма отбегает М. З., образуя магнитный переходный слой, в к-ром магн. поле и движение плазмы СВ становится менее упорядоченными.

При обтекании М. З. СВ геомагн. поле на больших расстояниях сильно искажается. Во внутр. М. З. до расстояний  $\approx 3R_{\oplus}$  оно близко к полю геомагн. диполя (угол между осью диполя и осью вращения Земли  $\approx 11^\circ$ , причём ось магн. полюс расположен в области юж. географич. полюса). Во внутр. М. З. геомагн. поле на дневной (расположенной ближе к Солнцу, чем центр Земли) стороне сжато СВ ( $D_{\oplus} \approx 10 R_{\oplus}$ ). На дневной стороне расположены каспы — воронки, расширяющиеся от поверхности Земли вилот до магнитопаузы, образованные силовыми линиями геомагн. поля. Эти воронки (по одной в каждом полушарии) разделяют силовые линии дневной М. З. и геомагн. хвоста (см. ниже). Через каспы плазма из магн. переходного слоя может проникать непосредственно в глубь М. З. На ночной стороне М. З. геомагн. поле образует геомагнитный хвост. Его длина,  $\approx 40 R_{\oplus}$ , протяжённость  $\sim 10^8 R_{\oplus}$ . Геомагн. хвост образован двумя пучками силовых линий с противоположными направленными магн. поля. Эти пучки составляют южную и северную доли геомагнитного хвоста. Между долями геомагн. хвоста расположен плазменный слой — область с поввш. концентрацией горячей плазмы с очень слабым магн. полем (табл. 1). Толщина плазменного слоя  $\approx 5 R_{\oplus}$ , энергия магн. поля в нём меньше или порядка тепловой энергии частиц.

Плазменный слой образован плазмой СВ, нагретой внутримagnetосферными процессами до  $\approx 5 \cdot 10^4$  К, и ускоренными ионосферными ионами. Ток, ответственный за резкое изменение направления магн. поля в долях хвоста, протекает в нейтральном токовом слое внутри плазменного слоя. Этот ток поперёк хвоста направлен с утренней стороны на вечернюю. Он обусловлен дрейфом заряженных частиц под действием центробежной силы (центробежный дрейф) и силы, связанной с градиентом магн. поля (градиентный дрейф).

**Пограничные слои.** Проникновение плазмы СВ внутрь М. З. может происходить через пограничные слои, располагающиеся на дневной (входной слой) и ночной (плазменная мантия и плазменный слой) сторонах М. З. Проникновение происходит вдоль нерасходящихся магн. силовых линий. Пересоединение магн. поля набегающего потока СВ (межпланетного магн. поля, ММП) и магн. поля Земли может происходить на магнитопаузе и в геомагн. хвосте в ограниченных по масштабам областях, в к-рых благодаря развитости плазменных неустойчивостей понижается электропроводность плазмы (см. *Пересоединение*). Измерения показали, что пересоединение происходит в областях с размерами  $\sim 1 R_{\oplus}$  и носит импульсный (во времени) характер. Скорость течения плазмы к Земле во входном слое и в антисолнечном направлении в плазменной мантии и геом. характеристики пограничных слоёв определяются характером взаимодействия СВ с М. З., к-рое зависит от взаимной ориентации магн. полей в этих двух областях. Область на дневной стороне, в к-рой происходит пересоединение, определяется знаком север-южного компонента ММП ( $B_z$ ). При св. направлении ММП ( $B_z > 0$ ) пересоединение происходит в плазменной мантии в области каспа (рис. 2, а). При юж. направлении ММП ( $B_z < 0$ ) геомагн. поле и ММП пересоединяются во входном слое в области подсолнечной точки ( $H_2$ ), где они антипараллельны (рис. 2, б). Пересоединившиеся геомагн. силовые линии переносятся СВ с дневной стороны М. З. на

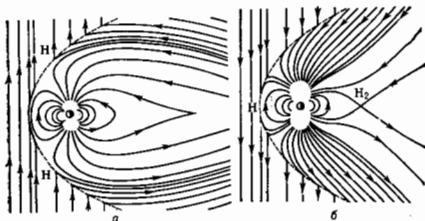


Рис. 2. Структура магнитного поля магнитосферы Земли (меридиональный разрез) при северном (а) и южном (б) направлении межпланетного магнитного поля (север — вверх). Буквами  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H$  отмечены области вблизи нейтральных точек магнитного поля.

ночь, образуя геомагн. хвост. Следует отметить, что перенос геомагн. силовых линий с дневной стороны М. З. на ночную происходит также и в результате вязкого трения при обтекании М. З. потоком плазмы СВ. Эффективность переноса магн. потока под действием аномальной вязкости между М. З. и межпланетной плазмой в среднем сравнима с эффектом переноса за счёт пересоединения. На ночной стороне в области  $H_2$  происходит новое пересоединение, в результате к-рого восстанавливается первонач. конфигурация магн. поля СВ. Из области  $H_2$  пересоединившиеся геомагн. силовые линии вместе с плазмой переносятся к Земле, восстанавливая магн. поток на её дневной стороне.

### Крупномасштабная конвекция плазмы в М. З.

**Конвекция в хвосте М. З.** Такое движение плазмы (магнитосферная конвекция, или дрейф плазмы поперёк геомагн. поля) обусловлено тем, что в хвосте М. З. существует крупномасштабное электрич. поле, направленное поперёк хвоста. Под действием этого электрич. поля и магн. поля хвоста плазма дрейфует от плазменной мантии к плазменному слою и из плазменного слоя по направлению к Земле. Электрич. поле поперёк хвоста обусловлено магн. пересоединением и вязким трением между СВ и М. З. Электрич. поле в хвосте при вязком трении есть результат движения плазмы в пограничном слое поперёк магн. поля и появления на внутр. границе пограничного слоя поляризац. зарядов. Перепад потенциала из-за электрич. поля, обусловленного вязким трением, равен  $10-30$  кВ и возрастает с увеличением скорости СВ. В процессе пересоединения через пересоединившиеся магн. силовые линии в М. З. передаётся межпланетное электрич. поле, к-рое в СВ определяется соотношением  $E = -[V \times B]/c$ . Эффективность передачи  $10-30\%$ , что приводит к появлению в М. З. разности потенциалов поперёк хвоста  $\sim 100$  кВ. Результирующая разность потенциалов существенно зависит от направления ММП. При интенсивных  $B_z > 0$  в долях геомагн. хвоста, проецирующихся на дневную сектор полярной шапки, направление электрич. поля меняется и оно становится направленным с вечера на утро.

**Плазмосфера.** Участвуя в крупномасштабной конвекции, плазма М. З. на больших расстояниях способна покидать М. З. через дневную магнитопаузу, при этом концентрация холодной плазмы за пределами плазмосферы резко уменьшается (по сравнению с концентрацией плазмы в плазмосфере, в к-рую конвекция не проникает). Плазмосферой наз. область с повыш. концентрацией ( $n$ ) плазмы ионосферы происхождения ( $n \sim 10^9$  см $^{-3}$ ) и тепловой энергией  $\sim 1,0$  эВ. Внеш. граница плазмосферы, образованная силовыми линиями геомагн. поля, на к-рых концентрация плазмы резко падает до  $0,1-1,0$  см $^{-3}$ , наз. плазмосферой Г. Геоцентрич. расстояние плазмосферы  $\sim 4R_{\oplus}$  и меняется в зависимости от местного времени и интенсивности магнитосферных возмущений (см. ниже). Образование плазмосферы обусловлено суточным вращением Земли вместе с геомагн. полем, увлекающим за собой плазму М. З. вплоть до высот  $3 \cdot 10^4$  км. На высоких геомагн. широтах силовые линии магн. поля практически перпендикулярны ионосфере. Вдоль этих линий из ионосферы в М. З. движется поток плазмы, наз. полярным ветром. Полярный ветер переносит нагретую плазму в удалённые области хвоста М. З., пополняя М. З. ионами из верх. атмосферы.

### Крупномасштабные продольные токи

Возникающие в пограничных областях М. З. электрич. поле, обусловленное пересоединением и вязким трением, приводит к появлению продольных электрич. токов, текущих вдоль магн. силовых линий. Эти токи замыкаются через высокопроводящую ионосферу, втекающая в неё на утренней стороне и вытекающая на вечерней. Ионосфера в этой цепи является нагрузкой. Т. о., в М. З. действует МГД-генератор, преобразующий кинетич. энергию плазмы СВ в энергию магнитосферно-ионосферных токов, к-рая затем диссипирует внутри ионосферы (энергетич. характеристики М. З. приведены в табл. 2). С усилением возмущённости М. З. интенсивность продольных токов увеличивается в неск. раз. Продольные токи существуют в М. З. постоянно. Область их втекания и вытекания образует практически непрерывную полосу вдоль а в р о л н о г о а в л а д, являющегося проекцией плазменного слоя и каспа вдоль геомагн. силовых линий на высоту  $100-200$  км над поверхностью Земли. К акватору от этой полосы существуют продольные токи противоположного нап-

равления — они втекают в вечернем секторе и вытекают в утреннем. Эти токи обусловлены замыканием через ионосферу возникающих при конвекции плазмы на геомагн. хвоста дрейфовых токов. Структура и интенсивность крупномасштабных продольных токов критич. образом зависит от направления и величины ММП. Азимутальный (направленный с утра на вечер) компонент ММП ( $B_y$ ) контролирует продольные токи в области каспа. При  $B_y > 0$  ( $B_y < 0$ ) токи втекают (вытекают) к экватору от каспа и вытекают (втекают) к полюсу от каспа. В интервалах времени, когда  $B_z > 0$ , на дневной стороне полярной шапки продольные токи втекают в послеполюденном секторе и вытекают в предполюденном. Общая интенсивность продольных токов составляет  $(1-3) \cdot 10^6$  А, они являются важным элементом электродинамич. структуры М. З., т. к. переносят от её границ энергию СВ на высоту ионосферы.

#### Магнитосферные возмущения

**Полярные сияния.** Геом. характеристики М. З. и потоки заряд. частиц чутко реагируют на изменения в СВ. В определенных ситуациях возникают магнитосферные возмущения длительностью 1—2 ч — сложный комплекс явлений, получивший назв. магнитосферной суббури. Накладываясь во времени, магнитосферные суббури приводят к возникновению магнитной бури (см. *Магнитные вариации*). Во время магн. бури и суббури происходит усиленная диссипация энергии в М. З. ( $\sim 10^{11}$  Вт). Эта энергия выделяется в виде диоулена тепла ионосферных токов (питаемых продольными токами из М. З.), вторичный в верх. атмосферу потоков ускоренных заряд. и нейтральных частиц. Возникают интенсивные полярные сияния. Осн. энерговыделение (на единицу площади) на высотах полярных сияний 100—200 км)  $10^{13}$ — $10^{15}$  Вт·см $^{-2}$  происходит вдоль аврорального овала. Вдоль аврорального овала наблюдаются яркие полярные сияния, и в ионосфере текут наиб. интенсивные токи. К полюсу и к экватору от аврорального овала потоки вторичных в атмосферу частиц резко уменьшаются и энерговыделение падает до  $10^8$  Вт·см $^{-2}$ . Вторичные заряд. частиц из плазменного слоя, приводящие к возникновению диффузного аврорального свечения на восточной стороне Земли, связано с крупномасштабной конвекцией плазмы. В процессе дрейфа происходит ускорение заряд. частиц, причём поперечные составляющие скорости увеличиваются быстрее продольной и распределение плазмы по скоростям становится анизотропным. Это приводит к возбуждению волн типа свистов и рассеянию частиц на этих волнах. Частицы попадают в «ловушку потерь» (см. *Магнитные ловушки*) и высылаются в атмосферу, возбуждая её свечение. Крупномасштабная конвекция в М. З. неоднородна, она расслаивается даже в сноковом состоянии. В ней возникает мелкомасштабные шедвородности электрич. поля, продольного тока, потоков энергичных заряд. частиц, концентрации тепловой плазмы. Эти неоднородности в проекции на высоту ионосферы имеют масштаб от  $10^2$  до  $10^4$  м поперёк направления геомагн. поля. Дуги полярных сияний — одно из проявлений мелкомасштабного расслоения конвекции. Появление дуг полярных сияний связано с локальным усилением продольного тока в результате внутримангнитосферных процессов или трения конвек-

тивного потока об ионосферу. При превышении предельных токов лек-кого критич. значения возбуждается токовая неустойчивость (см. *Неустойчивости плазм*), нелинейное насыщение к-рой приводит к возникновению на авроральных силовых линиях (на высотах  $1-2 R_{\oplus}$ ) двойного электрического слоя и (или) аномального сопротивления плазмы. В области существования продольного электрич. поля с разностью потенциалов в неск. кВ происходит ускорение электронов по направлению к Земле. Их вторжения в атмосферу проявляются в виде дискретных форм полярных сияний.

**Кольцевой ток и радиационный пояс.** Ионы из атмосферы вытягиваются продольным электрич. полем в плазменный слой геомагн. хвоста. Участвуя затем в крупномасштабной магнитосферной конвекции и ускоряясь, ионы попадают во внутрь. М. З. и образуют значит. часть ионного состава магнитосферного кольцевого тока. Магнитосферный ионный кольцевой ток образован энергичными заряд. частицами, движущимися вокруг Земли на геосинхрон. расстояниях 3—6  $R_{\oplus}$ . Азимутальное движение электронов на восток и протонов на запад обусловлено центробежным и гравитным дрейфами частиц с энергиями от  $10$  до  $10^6$  кэВ, инжектированных в область замкнутых геомагн. силовых линий из плазменного слоя хвоста М. З. во время магнитосферных суббурь. Результирующий электрич. ток течёт вокруг Земли в зап. направлении, вызывая понижение горизонтальной составляющей геомагн. поля на поверхности Земли. Большая часть энергии тока сосредоточена в зонах. Кольцевой ток состоит в основном из ионов  $H^+$ ,  $O^+$  с добавкой  $He^+$ ,  $Ne^+$ . Источником ионов кислорода является ионосфера, ионов водорода и гелия — СВ и ионосфера.

Область замкнутых геомагн. линий является магн. ловушкой для энергичных частиц, энергия к-рых превышает тепловую (геомагнитная ловушка). В ловушке существуют потоки очень энергичных частиц (электронов и протонов) с энергией св.  $1$  МэВ, образующих радиационный пояс. Во время магн. бури потоки в радиан. поясе увеличиваются. Инжекция частиц в радиан. пояс происходит из плазменного слоя во время суббурь. Ускорение частиц до высоких энергий обязано резонансу между периодом дрейфа частиц вокруг Земли и временными изменениями крупномасштабного электрич. поля. Приближение частиц к Земле в область более интенсивного магн. поля сопровождается увеличением их энергии. Очень высокие энергии частицы в радиан. поясе могут приобретать вследствие индукц. эффектов на силовых линиях хвоста М. З. при перестройке хвоста во время магнитосферных суббурь.

Кольцевой ток расположен во внеш. части радиан. пояса. Плазма кольцевого тока составляет только часть энергичных частиц радиан. пояса. В радиан. поясе существует механизм генерации энергичных заряд. частиц, отличающиеся от действующих в кольцевом токе. В ближайшей к Земле части радиан. пояса энергичные частицы могут возникать вследствие распада нейтронов, появляющихся при взаимодействии космич. лучей с поверхностью Земли.

#### Излучение М. З.

М. З. является источником волнового излучения в радиодиапазоне. Взаимодействие потоков ускоренных

Табл. 1. — Плазма в окрестности Земли

Область	Концентрация частиц, см $^{-3}$	Темп-ра ионов, эВ	Темп-ра электронов, эВ	Скорость потока, км/с	Магн. поле, $10^{-4}$ Гс
Солнечный ветер	5—20	10—20	20—40	300—800	5—15
Входной слой	1—10	200—2000	10—200	100—300	40—60
Плазменная мантия	0,1—5	100—200	28—40	100—200	20—30
Плазменный слой	0,1—1	500—5000	200—2000	0—1000	10—20
Кольцевой ток	2—20	$10^4$ — $10^6$	$10^4$ — $10^6$	—	$10^2$ — $5 \cdot 10^2$
Плазмосфера	$10^2$ — $10^8$	0,3—1	0,3—1	—	$10^2$ — $10^4$

Табл. 2. — Энергетические характеристики земной магнитосферы

	Мощность или энергия
Энергия солнечного ветра, падающая на поперечное сечение магнитосферы в 1 с	$2 \cdot 10^{14}$ Вт
Энергия солнечного ветра, ионизируемая в магнитосфере в 1 с	$3 \cdot 10^{11}$ Вт
Мощность эл.-магн. излучения Солнца, падающая на поперечное сечение Земли	$2 \cdot 10^{17}$ Вт
Излучение плазмы в магнитосферной кольцевой токе	$(2-10) \cdot 10^{10}$ Вт
Джоулей газорез в ионосфере	$6 \cdot 10^8$ Вт
Аварийная радиация (поток энергичных частиц, вторгающихся в верхнюю атмосферу)	$(5-100) \cdot 10^{10}$ Вт
Геомгнитные микроволнения ( $P_{\text{д}}$ )	$(4-10) \cdot 10^{10}$ Вт
Аварийное километровое излучение	$2 \cdot 10^7$ Вт
Энергия магн. поля, запасённая в хвосте	$(3-30) \cdot 10^{14}$ Дж
Энергия энергичных частиц, запасённая в магнитосферном кольцевом токе	$(2-10) \cdot 10^{14}$ Дж

электронов с магнитосферной плазмой на авроральных силовых линиях на высотах 5000 км приводит к генерации аврорального километрового излучения (АКИ). Это интенсивное и спорадически возникающее излучение в километровом диапазоне на гирочастоте электронов ( $10^2-10^4$  кГц) резко усиливается во время магнитосферных суббурь, достигая полной мощности  $10^8$  Вт. Помимо АКИ существует также непрерывное по спектру и во времени излучение. Интенсивность его в диапазоне  $0.5-100$  кГц уменьшается к высоким частотам. Это ветвевое излучение генерируется вие плазмой на геоцентрич. расстояниях от 4 до  $8 R_{\oplus}$  и является синхротронным излучением энергичных электронов в радиан. поясе.

Во время возмущений в М. З. возникает широкий спектр короткопериодич. колебаний геомагн. поля с периодами от 1 до 100 с. Набл. кол-во энергии сосредоточено в колебаниях магн. поля с периодом виск. десятков секунд и амплитудой  $\sim 10^{-4}$  Г.

Лит.: Сергеев В. А., Цыганенко Н. А., *Магнитосфера Земли*, М., 1980; *Solar-terrestrial physics. Principles and theoretical foundations*, ed. by R. L. Carovillano, J. M. Forbes, Dordrecht, 1983; *Progress in solar-terrestrial physics*, ed. by J. G. Roederer, Dordrecht — Boston, 1983; *Achievement of the International magnetosphere study* (I. M. S.), European Space Agency, 1984; Лавенс Л., Уильямс Д., *Физика магнитосферы: количественный подход*, пер. с англ., М., 1987.

Я. И. Фельдштейн.  
**МАГНИТОСФЕРЫ ПЛАНЕТ.** При обтекании планет солнечным ветром (СВ) могут возникать магнитосферы (М.) разл. типов (в зависимости от природы препятствия, создаваемого планетой для СВ).

Собственная М. В тех случаях, когда планета обладает магн. моментом, достаточно большим для того, чтобы давление собств. магн. поля уравновесило динамич. давление СВ за пределами ионосферы, образуется собств. М. — область в межпланетном пространстве, свободная (в первом приближении) от СВ и содержащая линии магн. поля, выходящие из планеты (см. рис. 1 в ст. *Магнитосфера Земли*). Собств. М. обладают Земля, Меркурий, Юпитер, Сатурн, Уран.

Наведённая, или индуцированная М. В тех случаях, когда собств. магн. поле незначительно и планета имеет достаточно плотную ионосферу, при контакте СВ с ионосферой в ней, под действием лоренцевой электрич. поля  $E = -[vB]/c$  ( $v$  и  $B$  — скорость и магн. поле СВ), возбуждается электрич. ток. Магн. поле этих токов и образует наведённую М. Таким М. обладают Венера и кометы.

Комбинированная М. Если собств. магн. поле планеты недостаточно для того, чтобы своим давлением предотвратить контакт СВ с ионосферой, но его величина соизмерима с величиной наведённого магн. поля, возникает комбиниров. М. Возможно, что М. такого типа обладают Марс.

М. всех трёх типов являются препятствием для сверхзвукового и сверхальтовского СВ, и перед ними возникает беспоточный ударная волна. Если небесное тело не имеет ни собств. магн. поля, ни ионосферы, то заряд. частицы СВ беспрепятственно достигают поверхности тела и рекомбинируют на ней. В результате позадн тела возникает полость, ограниченная *Мага комусом*. Так взаимодействуют с СВ Луна и, вероятно, большинство астероидов.

М. Меркурия была открыта в 1974 при пролётах около планеты автоматич. межпланетной станции (АМС) «Маринер-10». Магнитосфера Меркурия невелика (см. табл.), но в ней имеются все осн. черт. собственной М., за исключением плазмосферы и радиан. пояса (определения этих и др. терминов см. в ст. *Магнитосфера Земли*). Плазмосфера отсутствует, т. к. у Меркурия нет заметной ионосферы, а отсутствие радиан. пояса объясняется тем, что область замкнутых магн. силовых линий мала и токовый слой магн. хвоста начинается почти от поверхности планеты. В М. Меркурия были обнаружены быстрые перестройки конфигурации магн. поля с характерным временем 1 мин, к-рые были интерпретированы как суббури.

Основные параметры магнитосфер планет

Планета	Тип магнитосферы	Магнитный момент, Гс·см <sup>3</sup>	Ориентация	Радиус Чепмена—Феррара, км
Меркурий	собственная	$4,9 \cdot 10^{22}$	$14^\circ+$	$2,56 \cdot 10^8$
Венера . . .	наведённая	$1 \cdot 10^{22}$	—	$7 \cdot 10^8$
Земля . . .	собственная	$8,1 \cdot 10^{28}$	$11,7^\circ+$	$4 \cdot 10^4$
Марс . . .	наведённая	$1 \cdot 10^{22}$	$15^\circ+$	$(3,8-4) \cdot 10^8$
Юпитер . . .	комбинированная	$1,6 \cdot 10^{30}$	$9,6^\circ+$	$4,3 \cdot 10^4$
Сатурн . . .	собственная	$4,4 \cdot 10^{28}$	$1^\circ-$	$1,3 \cdot 10^8$
Уран . . .	—	$4 \cdot 10^{27}$	$60^\circ-$	$4,7 \cdot 10^8$

М. Венеры. Первые исследования взаимодействия СВ с Венерой были выполнены в 1967 на АМС «Венера-4» и «Маринер-5», к-рые не обнаружили следов собств. магн. поля Венеры и позволили лишь установить верх. предел для магн. момента планеты. АМС «Венера-9, -10» в 1976 обнаружили протяжённый магн. хвост, топология к-рого напоминает топологию хвоста собств. М., но ориентация магн. поля в нём полностью определяется межпланетным магн. полем (ММП). Наведённая М. Венеры была подробно исследована АМС «Венера-9, -10» и «Пионер — Венера». Её конфигурация изображена на рис. 1. На дневной стороне индуцированные в ионосфере лоренцевские электрич. токи экранируют её от проникновения ММП (магн. поле в ионосфере  $\sim 10^{-5}$  Гс). Ионосфера имеет резкую границу — ионопаузу, и перед ней поле лоренцевских токов создаёт магн. барьер ( $\approx 8 \times 10^{-4}$  Гс), к-рый тормозит плазму СВ. Отд. силовые трубки из магн. барьера могут проникать внутрь ионосферы, где в них возбуждается продольный ток, в результате к-рого трубки сворачиваются в магн. жгуты. На ночной стороне линии магн. поля, огибают ионосферу, вытягиваются в направлении от Солнца, образуя магн. хвост. Ориентация токового слоя в этом хвосте определяется направлением ММП. Такой механизм образования наведённой М. при взаимодействии потока замагниченной плазмы с плазменным препятствием был предложен Х. Альсвеном

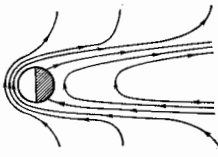


Рис. 1. Наведённая магнитосфера Венеры. Показаны линии магнитного поля, обтекающие ионосферу.

(Н. Алвén) для комет и вперые промониторингов в лаб. модельном эксперименте. Аналогичным образом взаимодействуют потоки плазмы внутри М. Юпитера и Сатурна с их спутниками Ио, Титаном и др.

М. Марса была исследована АМС «Марс-2, -3» (1972) и «Марс-5» (1974). Ввиду того что эти аппараты пересекали лишь её границы, их данные не поддаются однозначной интерпретации. Достаточно твёрдо установлено существование бессточников. ударной волны и области с регулярным магн. полем на дневной и ночной сторонах вблизи планеты. Эта область отождествлена с М.

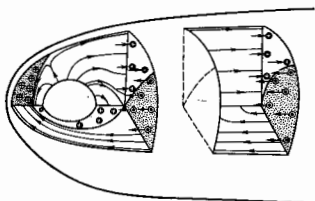


Рис. 2. Комбинированная магнитосфера. Линиями показаны силовые линии магнитного поля, крестинами и точками — направление магнитного поля, заштрихованные области соответствуют наведенному, незатрихованные — собственному магнитному полю.

Марса. В литературе приводятся величины магн. момента Марса от значений, отвечающих возникновению наведенной М. ( $10^{22}$  Гс·см<sup>2</sup>), до значений, соответствующих образованию собственной М. Большинство исследователей считают наиболее реальной величину магн. момента (1—1,5)· $10^{22}$  Гс·см<sup>2</sup>, при которой можно ожидать возникновения у Марса комбиниров. М., по крайней мере в тех случаях, когда давление СВ велико. Нет единения и в определении ориентации марсианского диполя. В комбиниров. М. можно ожидать существование раздельных областей наведенного и собственного магн. полей. Линии наведенного магн. поля должны обволакивать соевт. М. Схема комбиниров. М. в случае ММП, перпендикулярного оси диполя, приведена на рис. 2. В этом случае меридиональные сечения М. обнаруживают топоологию поля, характерную для соевт. М., а наведенное поле локализуется в экваториальной части М.

М. Юпитера и Сатурна. Существование соевт. магн. поля этих планет было установлено по синхротронному радиоизлучению частиц, захваченных в радиац. поясах. М. Юпитера исследована при пролётах АМС «Пионер-10, -11» и «Вояджер-1, -2» (1979), Сатурна — «Вояджер-1» (1980), «Вояджер-2» (1981). Юпитер и Сатурн обладают соевт. М. с присутствием или признаками. Характерной особенностью М. планет-гигантов является доминирующая роль центробежных сил. Размеры плазмосферы Юпитера и Сатурна таковы, что центробежные силы, воздействуя на плазмосферу, вытягивают линии магн. поля вблизи экватора и М. приобретает дискообразную форму, а токовый слой в плоскости экватора располагается не только на ночной, но и на дневной стороне. Наличие спутников внутри радиац. поясов приводит к уменьшению концентрации быстрых частиц в окрестностях орбит этих спутников из-за рекомбинации. Обнаружение полостей внутри радиац. поясов позволило открыть и определить орбиты ранее не известных спутников Юпитера и Сатурна. Удивительной особенностью Сатурна является совпадение его магн. осей с осью вращения (ранее генерация такого магн. поля считалась невозможной).

М. Урана. Косм. данные позволили предположить существование магн. момента у Урана; обнаружено

радиоизлучение планеты и свечение её атмосферы, которое может быть связано с полярными сияниями. Непосредственно магн. поле Урана было зарегистрировано в январе 1986 при пролёте АМС «Вояджер-2». Поскольку у Урана ось вращения лежит в плоскости эклиптики (см. *Координаты астрономической*), то ось магн. диполя периодически бывает направлена вдоль скорости СВ. В этом случае конфигурация соевт. М. будет радикально отличаться от изображённой на рис. 1 в ст. *Магнитосфера Земли*. Подобная М. (рис. 3) была исследована лишь в лаб. условиях. На дневной стороне

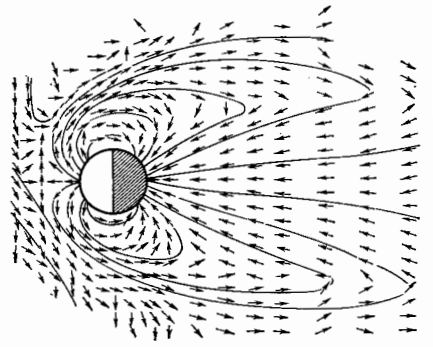


Рис. 3. Схема несимметричной магнитосферы (поименная магнитосфера Урана) по данным лабораторного эксперимента. Стрелками показано направление магнитного поля, сплошными линиями — линии магнитного поля в магнитосфере.

магн. силовые линии поджимаются к планете, а на ночной стороне образуется магн. хвост, состоящий из пучка силовых линий одного направления, охватывающего цилиндром, содержащим линии противоположного направления. Две части хвоста разделены цилиндрич. токовым слоем. Плазма СВ, необходимая для поддержания этого токового слоя, проникает внутрь М. через всю её границу, имеющую диффузный характер.

Данные о М. п. суммированы в табл. В колонке «Ориентация» приведено значение угла между магн. осью и осью вращения планеты, знак «+» (←→) означает, что северный магн. полюс расположен ближе к южному (северному) полюсу планеты.

Лит.: Н. е в с Н. Р. и др. Observations of Mercury's magnetic field, *Science*, 1976, т. 28, № 4, p. 479; Долгиков В. Ш. и др. О конфигурации поля в магнитном шлейфе Венеры, *Космич. исследования*, 1981, т. 19, в. 4, с. 624; Slavil J. A., Holzer R. E., The solar wind interaction with Mars revisited, *J. of Geophys. Research*, 1982, т. 87, № B12, p. 10285; Brimingham T. J., The Jovian magnetosphere, *Revs Geophys. and Space Phys.*, 1983, в. 21, № 2, p. 375; Sc h a r d t A. W., The magnetosphere of Saturn, *там же*, p. 390.

П. Д. Кербович, И. М. Павловский.

**МАГНИТОСФЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** — излучение, возникающее при движении заряж. частиц в магн. поле. В неоднородном магн. поле заряж. частицы движутся по окружности или спирали; в этом случае при движении частиц с релятивистскими скоростями возникает *синхротронное излучение*, при нерелятивистских скоростях — *циклотронное излучение*. Если частицы движутся в неоднородном магн. поле, может возникнуть *однатурное излучение* (периодич. поле), *изгибное излучение* и т. д. Наблюдается также М. и, испускаемое на торцевых областях поворотных магнитов синхротрона.

**МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫЕ ВОЛНЫ** — волны, возникающие в магнитоупорядоченных кристаллах — ферро- и антиферромагнетиках — из-за связи между магн. и

упругими свойствами вещества. Упругие волны, т. е. колебания ионов в кристаллич. решётке относительно положения равновесия, в магнитоупорядоченных кристаллах сопровождаются колебаниями спинов, а следовательно, и колебаниями их магн. моментов; в свою очередь колебания спинов, т. е. *спиновые волны*, вызывают смещение ионов. Т. о. появляется связь между фононной и спиновой, или магнитной, подсистемами. В М. в. изменение магн. параметров состояния (напр., намагниченности) связано с изменением упругих параметров (деформации, механич. напряжения). Возникновение М. в. — одно из проявлений *магнитоупругого взаимодействия*, к-рое в первом приближении можно описать магнитоупругой энергией единицы объёма вещества:

$$U = - b_{iklm} u_{ik} \frac{M_i M_m}{M_s M_0}, \quad (1)$$

где  $b_{iklm}$  — тензор магнитоупругих констант, имеющий размерность плотности энергии,  $u_{ik}$  — тензор деформаций,  $M_0$  — модуль вектора намагниченности,  $M_i/M_0$  и  $M_m/M_0$  — направляющие косинусы вектора намагниченности. В ф-ле (1) суммирование осуществляется по дважды встречающимся индексам. Здесь рассматриваются только те колебания, в к-рых модуль вектора  $M_0$  остаётся постоянным. Смесная М. в., в к-рой переменными величинами являются как механические, так и магн. параметры состояния, т. е. и  $u_{ik}$  и  $M_i$ , наиб. ярко проявляется в области частот, где длина упругой волны оказывается близкой по величине к длине спиновой волны (магнитоакустич. резонанс). Дисперсионное соотношение для спиновой волны имеет вид

$$\omega = \gamma \left( \frac{2A}{M_0} k^2 + H_1 \right)^{1/2} \left( \frac{2A}{M_0} k^2 + H_1 + 4\lambda M_0 \sin^2 \theta \right)^{1/2}, \quad (2)$$

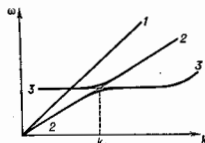
где  $\gamma$  — *магнитоакустическое отношение* для электрона,  $A$  — обменная постоянная,  $H_1 = H_0 - 4\lambda N M_0$ ,  $H_0$  — напряжённость внешнего постоянного поля,  $\lambda$ ,  $N$  — размагничивающий фактор,  $k$  — волновой вектор,  $\theta$  — угол между направлениями  $H_0$  и  $k$ . Дисперсионные соотношения для продольной и поперечной упругих волн имеют вид  $\omega = c_l k$ ,  $\omega = c_t k$ , где  $c_l$  и  $c_t$  — скорости звука для продольной и поперечной упругих волн.

Особенности поведения М. в. можно рассмотреть на примере плоских волн, распространяющихся вдоль одного из рёбер решётки кубич. кристалла. Если внеш. магн. поле  $H_0$  ориентировано вдоль направления распространения волны ( $\theta = 0$ ), то при наличии магнитоупругой связи дисперсионные соотношения для продольной и поперечной волн примут вид

$$\omega^2 - c_l^2 k^2 = 0, \quad (3)$$

$$(\omega^2 - c_t^2 k^2) \left( \omega \pm \frac{1}{\rho M_s} |b^2 k^2| \right) = 0. \quad (4)$$

Здесь  $b$  — магнитоупругая константа,  $\rho$  — плотность вещества,  $M_s$  — намагниченность насыщения,  $\omega_{сп}$  — значение  $\omega$ , соответствующее решению дисперсионного соотношения (2). В этом случае продольная часть фононного спектра оказывается не связанной с магн. подсистемой (кривая 1 на рис.), а для поперечных волн возможны два решения  $k_+$  и  $k_-$ , соответствующих двум знакам в соотношении (4). Пересечение дисперсионных кривых поперечной



Дисперсионные кривые в области взаимодействия. 1 — продольная упругая волна, 2 — поперечная упругая волна, 3 — спиновая волна.

О 2 Физическая интерпретация, т. 3

упругой (кривая 2) и спиновой (кривая 3) волн происходит при значении волнового числа  $k = k_0$ , т. е.

$$c_l k_0 = \gamma \left( H_1 + \frac{2A}{M_0} k_0^2 \right).$$

При  $k < k_0$  сплошная кривая 3—2 соответствует чисто спиновой волне, а кривая 2—3 — чисто поперечной упругой и обе волны распространяются со своими скоростями почти независимо друг от друга. При  $k > k_0$  кривая 3—2 соответствует упругой волне, а кривая 2—3 — спиновой и снова волны почти не зависят друг от друга. В области пересечения существуют две связанные М. в., описываемые соотношением (4). При  $k \approx k_0$  происходит расщепление дисперсионных кривых на две ветви с частотами

$$\omega = \omega_0 \pm \Delta\omega, \quad \text{где } \omega_0 = c_l k_0, \quad \Delta\omega = \sqrt{\gamma^2 b^2 \omega_0^2 / c_l^2 \rho M_s^2}$$

(масштаб кривых на рис. преднамеренно сильно искажён, т. к. обычно  $\Delta\omega \ll \omega_0$ ).

При фиксиров. частоте  $\omega$  магнитоупругое взаимодействие обуславливает возможность появления двух волн с волновыми числами  $k_+$  и  $k_-$ , к-рые распространяются с разной скоростью. Это приводит к вращению плоскости поляризации линейно поляризованной сдвиговой волны. Угол  $\varphi$ , на к-рый поворачивается плоскость поляризации в волне, прошедшей расстояние  $z$ , равен

$$\varphi = \frac{z}{2} (k_+ - k_-) = \frac{\gamma b^2 \omega}{2 M_s \rho c_l} \cdot \frac{1}{\omega^2 - \omega_0^2 + 2 \omega \gamma b^2 / M_s \rho c_l^2}$$

где  $\omega_0 = |c_l k_0|$ .

М. в. могут использоваться для преобразования звуковой волны в спиновую и обратно. В таких материалах, как, напр., монокристаллы ферритов-гранатов, на частотах  $\sim 10^9$  Гц гораздо легче возбудить и принять спиновую волну, чем звуковую. Если образец феррита поместить в СВЧ-резонатор и возбудить в нём спиновую волну, то при наличии пост. магн. поля, неоднородного по пространству, по образцу побежит спиновая волна с переменным волновым числом  $k$ . При уменьшении напряжённости поля  $H$  в направлении распространения спиновой волны и при фиксиров. частоте  $\omega$ , задаваемой резонатором, величина  $k$  по мере распространения будет увеличиваться. Когда она достигнет значения  $k \approx k_0$ , спиновая волна вследствие магнитоупругого взаимодействия превратится в магнитоупругую, а при дальнейшем увеличении  $k$  — в чисто упругую волну. Дальнейшее уменьшение  $H$  уже не будет влиять на характер распространения упругой волны. При таком преобразовании скорость распространения волн изменится, поскольку скорость упругой волны гораздо больше, чем скорость спиновой волны. Если, начиная с к.-л. точки пространства, величина  $H$  возрастает, и следовательно, волновое число для спиновых волн уменьшается, то может произойти обратное преобразование звуковой волны в спиновую. Т. о., создавая в образце неоднородное магн. поле, можно преобразовывать друг в друга упругие и спиновые волны и тем самым изменять скорость распространения и время прохождения сигнала по образцу.

Взаимодействие спиновых и упругих волн осуществляется на высоких УЗ- и гиперзвуковых частотах, поскольку область существования спиновых волн ограничена снизу частотами  $\sim 10^8$  Гц. Верх. граница для М. в. также определяется возможностью получения спиновых волн и составляет  $\sim 5 \cdot 10^{14}$  Гц.

Наилучшим материалом для возбуждения М. в. являются ферриты, в частности монокристаллы железотитриного граната, обладающие высокой добротностью как магнитной, так и упругой подсистем. Эти кристаллы используются в *акустоэлектронике* для изготовления *линий задержки* сигналов СВЧ. Управляя посредством неоднородного магн. поля скоростью распространения сигнала (за счёт преобразования волн), можно

создавать линии с переменным временем задержки и использовать усиление М. в., возникающее из-за нелинейности магнитоупругого взаимодействия, можно добиться значит. снижения потерь при распространении сигнала.

Лит.: Ахнерер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетинский С. В., Спиново волны, М., 1967; Физическая акустика, под ред. У. Мэсона, пер. с англ., т. 3, ч. Б. М., 1968, гл. 4; т. 4, ч. Б. М., 1970, гл. 5; Мюне со в. И. А., Бондлей-ная ферромагнитный резонанс, М., 1971; Такао Д. и др., Р. м. п. т. о. В., Гипервуз в физике твердого тела, пер. с англ., М., 1975; Красильников В. А., Крылов В. В., Введение в физическую акустику, М., 1984. А. Л. Полюхов.

**МАГНИТОУПРУГОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — взаимное влияние намагниченности и упругих деформаций среды (связь спиновой подсистемы кристалла с кристаллич. решёткой). М. в. проявляется, напр., в изменении размеров и формы тела (образца) при его намагничивании (*магнитоустрикция*), а также в изменении намагниченности при деформации образца (магнитоупругий эффект, или *Виллари эффект*).

Основные представления. М. в. обусловлено тем, что осн. взаимодействия магн. моментов атомов или ионов в веществе, напр. *объемное взаимодействие*, магн. диполь — дипольное взаимодействие, взаимодействие магн. моментов с *внутрикристаллическим полем*, зависят от расстояния между ними. Намагничивание кристалла изменяет характер этого взаимодействия, что проявляется в изменении расстояний между частицами, а макроскопически — в деформации образца (магнитоустрикции). В свою очередь изменение расстояний между частицами, т. е. деформация образца, изменяет силу взаимодействия между магн. частицами, а следовательно, и их ср. магн. моменты, т. е. намагниченность образца, темп-ру Кюри, магн. анизотропию и т. д.

Возникающая при намагничивании деформация приводит к уменьшению отд. составляющих энергии образца — обменной энергии, энергии магн. анизотропии, магнитодипольной энергии. Суммарное изменение энергии образца в результате его деформации при намагничивании определяет магнитоупругую энергию образца (или энергию М. в.). С др. стороны, возникновение деформации вызывает нек-рое увеличение энергии упругой деформации, по оно, конечно, меньше выигрыша в энергии М. в., иначе не возникла бы магнитоустрикция.

Различают изотропный вклад в энергию М. в., обычно имеющий обменное происхождение, и анизотропный, связанный с энергией магн. анизотропии. Первый является причиной т. н. объёмной магнитоустрикции, к-рая вносит вклад в теплового расширение образца, обладает характерной аномалией в районе *Кюри точки*, но не меняет кристаллографич. симметрии вещества. Анизотропная часть М. в. приводит к т. в. линейной магнитоустрикции и соответствующему изменению кристаллографич. симметрии кристалла, в соответствии с изменением *магнитной симметрии*.

М. в. оказывает влияние на фазовые переходы в точках Кюри и Нееля (см. *Магнитный фазовый переход*). Оно, в частности, может быть ответственно за то, что эти фазовые переходы протекают как переходы 1-го рода. Давая в нек-рых материалах значит. вклад в энергию магн. анизотропии, М. в. является причиной *ориентационных фазовых переходов*, например в (YTB)<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, RFe<sub>2</sub> (R — редкоземельный элемент).

В динамике магнитоупругих сред М. в. проявляется как взаимодействие *упругих волн* (фононов) и *спиновых волн*, приводящее к возникновению *магнитоупругих волн*. Для характеристики влияния М. в. на динамику, процессы вводят коэф. магнитоупругой связи, к-рый представляет собой отношение энергии М. в. в магнитоупругой волне к среднему геометрическому от энергий упругой и спиновой подсистем. Для ферромагн. кристалла:

$$\zeta = (\chi V^2 / CM^2)^{1/2},$$

где  $\chi$  — модуль упругости материала,  $M$  — намагниченность,  $\chi$  — квазиэстатич. *магнитная восприимчивость*,  $V$  — характерное значение энергии М. н. (или, точнее, магнитоупругих параметров М. в. (см. ниже)). Для типичных ферромагн. материалов:  $V \sim 10^6 - 10^7$  эрг/см<sup>3</sup>,  $C \sim 10^{12}$  эрг/см<sup>2</sup>,  $M^2 \sim 10^{14} - 10^8$  эрг/см<sup>3</sup>,  $\gamma \sim 1$  и коэф. связи  $\zeta \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ . При такой слабой связи можно рассматривать волны, распространяющиеся в ферромагн. кристалле, как не взаимодействующие чисто упругие и спиновые волны. Иная ситуация возникает в условиях пересечения спектров упругих и спиновых волн, где М. в. становится сильным и приводит к разнообразным интересным эффектам (например, *магнитоакустическому резонансу*). Сильной магнитоупругой связью обладают некие соединения редкоземельных металлов и актиноидов с металлами группы железа, напр. TbFe<sub>2</sub>, UFe<sub>2</sub>, аморфные сплавы типа Fe—Si—B, Co—Fe—Si—B, а также  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeTiO<sub>3</sub>, MnCO<sub>3</sub>, CoCO<sub>3</sub>, CaMnF<sub>6</sub> и антиферромагн. кристаллы с анизотропией типа «слабая плоскость» ( $\zeta \lesssim 1$ ). В последних М. в. ответственно за существование энергии активации высокочастотных спиновых волн — эффект магнитоупругой щели в спектре магновов (А. С. Боровик-Романов, Е. Г. Рудашевский, Е. А. Туров, В. Г. Шаров, 1964).

Под влиянием М. в. возникает  $\Delta E$ -эффект (см. *Магнитоустрикция*) и происходит изменение скорости звука под воздействием магн. поля, достигающее 50% и более в веществах с большим коэф. магнитоупругой связи. Высокая чувствительность упругих модулей к воздействию магн. поля в таких материалах является основой параметр. магнитоупругих явлений (параметр. возбуждение магнитоупругих волн, преобразование спектра бегущих магнитоупругих волн, генерация гармоник, управление фокусировка звука неодородными магн. полем и т. д.). М. в. ответственно за акустич. эффекты Фарадея и двойного лучепреломления (В. И. Ожогин, В. Л. Преображенский, 1977) [4].

М. в. широко используется в технике; в частности, на нём основаны разнообразные *магнитоустрикционные преобразователи*.

М. в. представляет большой интерес для функциональной электроники (управляемые магн. полем линии задержки, перестраиваемые резонаторы и фильтры, фазовые модуляторы, конвольверы, анализаторы спектра и др.). В СВЧ-электронике активно исследуют М. в. поверхностных акустич. волн с *магнитоакустическими волнами* в магн. плёнках (Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, Tb<sub>2</sub>Fe<sub>1-x</sub> и др.).

**Феноменологическое описание М. в.** При теоретич. описании М. в. широко используется феноменологич. подход, основанный на теории симметрии кристаллов. Энергия М. в. записывается в виде разложения по инвариантам полиномам, составленным из компонентов тензора упругих *деформаций* среды  $\epsilon_{ij}$  и компонентов многомерного параметра порядка, характеризующего *магнитную атомную структуру* среды. В ферромагнетике (ФМ) в качестве параметра порядка используют намагниченность  $M_i$  в антиферромагнетике (АФМ) — векторы антиферромагнетизма и намагниченности, в ферримагнетиках (ФИМ) — намагниченности *магнитных подрешёток* и т. д. Энергия М. в. является чётной ф-цией магн. параметров порядка, откуда следует симметрия относительно инверсии времени (см. *Магнитная симметрия*).

Для ФМ в линейном приближении по  $\epsilon_{ij}$  и квадратичном по компонентам намагниченности энергия М. в. может быть представлена в виде

$$\mathcal{E}_{\text{мв}} = b_{ijkl} \epsilon_{ij} \alpha_k \alpha_l, \quad (1)$$

где  $b_{ijkl}$  — тензор магнитоупругих постоянных,  $\alpha_i$  — направляющие косинусы вектора намагниченности. В ф-ле (1) и далее суммирование осуществляется по дважды встречающимся индексам. Тензор четвёртого

ранга  $b_{ijkl}$  определяется точечной симметрией кристалла; он имеет в общем случае 36 независимых компонентов, однако условие  $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 = 1$  оставляет независимыми из них лишь 30. Конкретный вид тензора  $b_{ijkl}$  для разл. классов симметрии приведен, напр., в [1, 2]. Для кристаллов кубической (классы симметрии  $T_d, O_h, O_h$ ) и гексагональной (классы  $D_{3d}, C_{3v}, D_6, D_{6h}$ ) сингонии энергия М. в. имеет вид

$$\epsilon_{\text{МВ}}^{\text{куб}} = (b_{11} - b_{12}) (\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2 + \epsilon_{33}^2) + b_{44} (\epsilon_{12}\alpha_1\alpha_2 + \epsilon_{13}\alpha_1\alpha_3 + \epsilon_{23}\alpha_2\alpha_3), \quad (2)$$

$$\epsilon_{\text{МВ}}^{\text{гекс}} = (b_{11} - b_{12}) (\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2 + 2\epsilon_{12}\alpha_1\alpha_2) + (b_{13} - b_{12})(\epsilon_{11} + \epsilon_{22})\alpha_3^2 + (b_{33} - b_{21})\epsilon_{33}\alpha_3^2 + 2b_{44}(\epsilon_{23}\alpha_2\alpha_3 + \epsilon_{13}\alpha_1\alpha_3).$$

Здесь компоненты тензора  $b_{ijkl}$  записаны в матричных обозначениях Фогта.

Для кристаллов кубич. сингонии приняты обозначения:  $b_{11} - b_{12} = B_1$ ,  $b_{44} = B_2$ , с учётом к-рых энергия М. в. принимает вид

$$\epsilon_{\text{МВ}}^{\text{куб}} = B_1 (\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2 + \epsilon_{33}^2) + B_2 (\epsilon_{23}\alpha_2\alpha_3 + \epsilon_{13}\alpha_1\alpha_3 + \epsilon_{12}\alpha_1\alpha_2). \quad (3)$$

Магнитоуругое постоянные  $B_1$  и  $B_2$  связаны с константами магнитоэлектрики след. соотношениями

$$\lambda_{100} = (\Delta l / l)_{100} = -r^{(2)}_3 B_1 / (C_{11} - C_{12}), \quad (4)$$

$$\lambda_{111} = (\Delta l / l)_{111} = -(l^{(1)}_3) B_2 / C_{44},$$

где  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{44}$  — упругие постоянные кубич. кристалла. В табл. приведены значения магнитоуругоих постоянных  $B_1$  и  $B_2$  для нек-рых магнитоупорядоченных кристаллов.

Кристаллы	$B_1$ ( $10^6 \frac{\text{Эрг}}{\text{см}^2}$ )	$B_2$ ( $10^6 \frac{\text{Эрг}}{\text{см}^2}$ )
$\text{Y}_2\text{Fe}_{17}\text{O}_{19}$	1,7	12,6
$\text{CaFe}_2\text{O}_4$ кубич.	165	-54
$\text{NiFe}_2\text{O}_4$	100	45
$\text{CoFe}_2\text{O}_4$	1400	1200
$\text{CdCr}_2\text{O}_4$	-3,9	42

Измерение магнитоэлектрики является распространённым методом определения констант М. в. Др. методы — ферромагн. резонанс (сдвиг частоты резонанса под влиянием М. в.),  $\Delta E$ -эффект и изменение скорости звука под влиянием М. в. поля, динамич. магнитоакустик. явления.

В ф-ле (1) магнитоуругое константы рассматриваются как феноменологич. параметры, к-рые определяются экспериментально. В микроскопич. теории М. в. эти параметры и их зависимость от темп-ры и магн. поля определяются для данного материала, исходя из его кристаллич. структуры и квантомеханич. характеристик магн. ионов. Выделяют М. в., основанное на магн. диполь-дипольном взаимодействии, на анизотропном обмене и на комбинированном с участием спин-орбитального, обменного взаимодействия и на внутрискристаллич. полях.

Для более полного описания М. в. в ф-лу (1) иногда приходится вводить слагаемые более высокого порядка по направляющим косинусам вектора намагниченности.

Ф-лу (1) можно использовать для описания М. в. в магнитоупорядоченных кристаллах с неск. магн. подрешётками; нужно лишь произвести в ней дополнит. суммирование по подрешёткам и учесть наличие перекрёст-

ных по подрешёткам слагаемых. Напр., для двухподрешёточного коллинеарного АФМ

$$\epsilon_{\text{МВ}} = b_{ijk}^{(1)} \epsilon_i^j \epsilon_k^l + b_{ijk}^{(2)} \epsilon_i^j m_k m_l, \quad (5)$$

где  $l, m$  — единичные векторы антиферромагнетизма и ферромагнетизма соответственно. В случае *слабого ферромагнетизма* энергия М. в. содержит смешанные инварианты типа  $P_{ijkl} \epsilon_i^j \epsilon_k^l m_l$ , ответственные за явления *псевдоагнетизма* и линейную магнитоэлектрику. Энергия, соответствующую таким инвариантам, наз. псевдоагнетич. В общем случае для определения вида энергии М. в. в многоподрешёточном ФМ используют простр. симметрию кристалла.

В феноменологич. теории М. в. предполагается, что температурная зависимость магнитоуругоих констант определяется тепловыми флуктуациями магн. моментов. Усреднение по флуктуациям приводит к уменьшению модуля намагниченности и вместе с ним к уменьшению коэффициентов в выражении для энергии М. в. Температурная зависимость последних определяется законом:

$$B_l(T)/B_l(0) = m^{l(l+1)/2}, \quad (6)$$

где  $l$  — степень полинома от  $\alpha_i$  в разложении энергии М. в.,  $B_l$  — коэф. полинома,  $m = M_s(T)/M_s(0)$  — приведенная намагниченность. Напр., для разложения (1—5), где  $l = 2$ , имеем  $B(T)/B(0) = m^3$ .

Эксперим. и теоретич. исследования М. в. показали, что энергия М. в. в форме (1) хорошо описывает магнитоуругое явления в тех материалах, в к-рых магн. ионы, ответственные за формирование магн. порядка, имеют в качестве осн. состояния орбитальный синглет, отделённый достаточно большим энергетич. интервалом от возбуждённых уровней. Примером таких ионов являются т. н.  $S$ -ионы, т. е. ионы, у к-рых в осн. состоянии орбитальный момент  $L$  равен нулю ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{2+}$  и др.), а также ионы с «замороженным» орбитальным моментом ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  в октаэдрич. окружении и др.). Др. тип ионов — ионы, у к-рых орбитальный момент в осн. состоянии отличен от нуля, напр. редкоземельные ионы,  $\text{Co}^{2+}$  в ферритах и др. Для описания М. в. таких ионов используют микроскопич. теорию.

Элементы атомно-микроскопической теории М. в. Микроскопич. описание М. в. основывается на применении *спинового гамильтониана*. Оно позволяет установить связь магнитоуругоих явлений с электронной структурой магнетика, выявить микроскопич. механизмы М. в., определить зависимость магнитоуругоих явлений от темп-ры, магн. поля, состава магнетика и др. факторов. В общем виде спиновый гамильтониан М. в. представляет собой сумму элементарных взаимодействий спиновых магн. моментов со смешениями полов от положений равновесия, включающими в себя упругие деформации (акустич. фононы) и смешения ионов внутр. элементарной ячейки (оптич. фононы). Различают спиновые гамильтонианы одноионного и двухионного М. в.

Одноионное М. в. обусловлено смешениями ионов кристалла при деформации, к-рые изменяют внутрискристаллич. поле, действующее на магн. ион, и тем самым энергия ионов в этом поле. Двухионное М. в. обусловлено зависимостью от деформации таких взаимодействий, как магнитодипольное, псевдодипольное, обменное.

В случае материалов, содержащих ионы с нулевым или «замороженным» орбитальным моментом, микроскопич. теория даёт для энергии М. в. выражение того же вида, что и феноменологич. теория. В частности, зависимость магнитоуругоих констант от темп-ры  $T$  и магн. поля  $H$  полностью определяется намагниченностью  $m(H, T)$  [Э. Каллен (E. Callen), X. Каллен (H. Callen), 1963]:

$$B_l(T)/B_l(0) = \int_{-1}^1 v_l^l [m(H, T)], \quad (7)$$



где  $J_{1/2}$  — приведенная ф-ция Бесселя:  $J_{1/2}(x) = \sqrt{x/2} J_1(x)$ ,  $J_{3/2}(x) = \sqrt{x/2} J_2(x)$ ,  $J_{5/2}(x) = \sqrt{x/2} J_3(x)$  — гиперболич. ф-ция Бесселя,  $L^{(2)}(x)$  — обратная Ланжевена функция  $[m(H, T) = L(x) = J_{5/2}(x)]$ . При достаточно низких темп-рах, когда можно пренебречь заселенностью всех уровней, кроме основного и первого возбужденного, ф-ла (7) приводит к известному закону  $B_s(T)/B_s(0) = m^{(d+1)/2}$ .

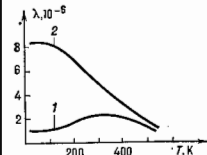


Рис. 1. Температурная зависимость констант магнитоэстрикции для  $Y_2Fe_5O_{12}$ : 1 —  $\lambda_{100}$ , 2 —  $\lambda_{111}$ .

Насыщение констант  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  происходит в тех же полях, что и насыщение намагниченности.

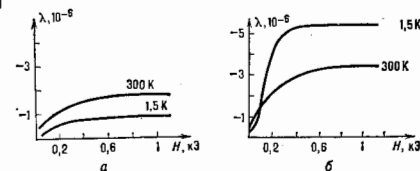


Рис. 2. Зависимость констант магнитоэстрикции  $Y_2Fe_5O_{12}$  от напряженности магнитного поля при разных температурах: а —  $\lambda_{100}$ , б —  $\lambda_{111}$ .

Ионы с  $L \neq 0$  в осн. состоянии обладают более разнообразными полевыми и температурными зависимостями  $M$ . в. Это также значительно больше по величине, чем  $M$ . в. ионов с  $L = 0$ , поэтому в редкоземельных соединениях, особенно при низких темп-рах, часто наблюдается т. н. гигантская магнитоэстрикция  $\sim 10^{-3} - 10^{-2}$  (К. П. Белов, Р. З. Левянтин, С. А. Никитин, В. И. Соколов, 1961 [3]).

Для определения температурной и полевой зависимости энергии  $M$ . в. с помощью синювого тампальтона трудно знать энергетич. спектр и волновые ф-ции иона. При низких темп-рах достаточно знать обычно один-два ниж. уровня. Энергия  $M$ . в. ионов с синглетным осн. состоянием ( $Eu^{2+}$ ,  $Ti^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$ , ...) имеет вид (в расчёте на один ион) [5]:

$$\epsilon_{мв} = b_{jHl}(H_{эф})_h(H_{эф})_l, \quad (8)$$

где  $H_{эф}$  — эфф. поле, действующее на ион; магнитоупругие постоянные  $b_{jHl} \sim V m_B^2 W^{-1}$ ,  $W$  — характерная энергия, отделяющая осн. уровень от возбужденных ( $\sim 10^{-4} - 10^2$  см $^{-1}$ ),  $m_B$  — магнетон Бора,  $V \sim 10^2 - 10^3$  см $^{-3}$  — магнитоупругий коэффициент.

Энергия  $M$ . в. крамеровских ионов, осн. состоянием к-рых во внутрикристаллич. поле является дублет ( $Dy^{3+}$ ,  $Er^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$ , ...), имеет вид

$$\epsilon_{мв} = b_{jHl} e_{ij}(H_{эф})_h m_l(H_{эф})_T, \quad (8')$$

где  $b_{jHl} \sim m_B V W^{-1}$ .

Температурная и полевая зависимости  $M$ . в. в этом случае определяются произведениями типа  $(H_{эф})_h m_l$ , а не  $[m(H_{эф}, T)]^{(d+1)/2}$ , как в феноменологич. теории. Др.

важная особенность  $M$ . в. в материалах с такими ионами заключается в том, что их магнитоупругие коэф. обладают сильной полевой зависимостью в области насыщения намагниченности (в феноменологич. теории константы магнитоэстрикции при этом от поля вообще не зависят). Это обстоятельство обусловлено тем, что постоянные  $M$ . в. определяются не только ниж. уровнями энергии, а гл. обр. возбужденными состояниями, что является своеобразным аналогом ванфleckовской восприимчивости в магнитоупругих явлениях (см. Ванфлексовский парамагнетизм).

Осн. состоянием некрамеровских ионов в низкосимметричном внутрикристаллич. поле часто является изолированный квазидублет, т. е. два близко расположенных уровня, отделяемых от возбужденных уровней достаточно большим энергетич. интервалом. Для приближенного описания  $M$ . в. этих ионов можно использовать ф-лу (8). На рис. 3 приведена полевая зависимость магнитоэстрикции тербийового диспрозиового граната, хорошо иллюстрирующая особенность  $M$ . в. в материалах с сильно анизотропными ионами, обладающими орбитальным моментом в осн. состоянии. Для полей, где намагниченность стремится к насыщению ( $H \gtrsim 30$  кЭ), характерно, что константы магнитоэстрикции линейно увеличиваются с ростом поля  $H$ ,

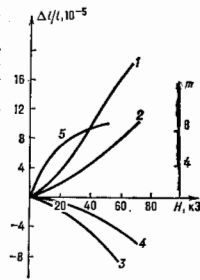


Рис. 3. Зависимость магнитоэстрикции тербий-гадолиевого граната ( $Tb_2Fe_4O_{12}$ ) от напряженности магнитного поля при 4,2 К: 1 —  $H || [111]$ , 2 —  $H || [110]$ , 3 —  $H || [11\bar{1}]$ , 4 —  $H || [1\bar{1}1]$ , 5 — зависимость намагниченности (в единицах  $\mu_B$ /ион) вдоль направления  $[111]$  от напряженности магнитного поля.

не проявляя к-л. тенденций к насыщению. Аналитич. зависимость магнитоэстрикции этого соединения от  $H$  и  $T$  может быть представлена ф-лой, сильно отличающейся от тех, к-рые определяются феноменологич. теорией:

$$(\Delta l/l)_{111} = A_1 I_1(H) + A_2 I_2(H), \quad (9)$$

где

$$I_1(H) = 1/2(Hx_m m_y + Hx_m z + Hy_m x + Hy_m z + Hz_m x + Hz_m z + Hx_m y),$$

$$I_2(H) = HxHyH_y^{-1} m_z + HxHzHy^{-1} m_y + HyHzH_z^{-1} m_x;$$

$m_x = \text{th}(1/2 T^{-1} \mu H_x)$  — компоненты приведенной намагниченности редкоземельных ионов  $Dy^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$ ,  $\alpha = x, y, z$ ;  $A_1$  и  $A_2$  — константы магнитоэстрикции,  $\mu$  — магн. момент иона.

Двухионные  $M$ . в. важно учитывать в низкосимметричных материалах, а также в магнетиках кубической сингонии, обладающих сложной пространственной и магнитной структурой, например в редкоземельных ферритах-гранатах. На рис. 4 приведена полевая зависимость констант

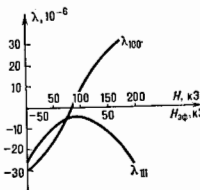


Рис. 4. Зависимость констант магнитоэстрикции  $\lambda_{111}$  и  $\lambda_{100}$  гольемит-иттербиевого феррита-граната  $Ho_2Fe_5O_{12}$  от напряженности магнитного поля при 78 К.

магнитоэлектрики (HoY)<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>12</sub> при 78 К, хорошо иллюстрирующая механизм двухфундого М. в. Видно, что константы  $\lambda_{111}$  и  $\lambda_{100}$  этого соединения существенно по-разному зависят от поля:  $\lambda_{111}$  квадратично меняется с полем, в то время как  $\lambda_{100}$  — почти линейная функция  $H_{эф}$ . Это позволяет однозначно установить, что  $\lambda_{111}$  определяется одноионным механизмом, а  $\lambda_{100}$  — в основном двухионным (обменным) М. в. Рис. 4 показывает также, что одноионный и обменный механизмы М. в. дают сравнимые вклады в магнитоэлектрику редкоземельных ферритов-гранатов.

Значительным М. в. обладают ионы Co<sup>2+</sup> в ферритах, где преобладает одноионный механизм, что также обусловлено неполным снятием орбитального вырождения осн. состояния [Дж. Словауски (J. Slonczewski), 1960].

Приведённые выше теории М. в. (как феноменологическая, так и микроскопическая) не являются достаточно полными, т. к. рассматривают взаимодействие магн. ионов с деформациями среды лишь в линейном по  $\epsilon_{ik}$  приближении и не учитывают их взаимодействия с локальными вращающимися средами. Учёт квадратичных по  $\epsilon_{ik}$  компонентов М. в. и взаимодействия магн. моментов с локальными поворотами

$$\Omega_{ik} = \frac{1}{2}(\partial_i \psi / \partial x_k - \partial_{ik} \psi / \partial x_i)$$

(здесь  $\partial_i \psi / \partial x_k$  и  $\partial_{ik} \psi / \partial x_i$  — компоненты тензора механич. дисторсии) необходим при анализе неких эффектов, связанных с распространением звука в магнитоупорядоченных кристаллах, а также важен для теории симметрии: без учёта этих взаимодействий теория М. в. не удовлетворяет требованию вращат. инвариантности теории (симметрии относительно группы непрерывных вращений) [7].

Локальные вращения среды возникают при распространении звука или при др. магнитоупругих процессах и создают локальную магн. анизотропию, действующую на магн. моменты. Отсюда следует, что энергия взаимодействия магн. моментов с локальными поворотами определяется параметрами магнитоэлектрич. анизотропии и что это взаимодействие является особенно важным в материалах с большой величиной магн. анизотропии.

Лит.: 1) Леманов В. В., Магнитоупругие взаимодействия, в кн.: Физика магнитных диэлектриков, под ред. Г. А. Смолеского, Л., 1974; 2) Кузнецов Е. В., Петроваченко В. А., Завальский Э. А., Физика магнитоупорядоченных веществ, Новосибир., 1976; 3) Белов К. П. и др., Гигантская магнитоэлектрика, «УФН», 1983, т. 140, с. 271; 4) Ожогин В. И., Обменное усиление магнитоупругости в антиферромагнетиках, «Изв. АН СССР. Сер. физик», 1978, т. 42, № 8, с. 1625; 5) Редноземельные ионы в магнитоупорядоченных кристаллах, М., 1985; 6) Vigness R., Isaac E. D., Magnetoelectricity, в кн.: Magnetic oxides, ed. by D. G. Semakula, 1974; 7) Витков В. В., Magnetoelastic interaction, В. [а. о.], 1966; 8) Callen E., Callen N. V., Magnetostriction, forced magnetoelectricity, and anomalous thermal expansion in ferromagnets, «Phys. Rev.», 1965, т. 139, p. 435; 9) Туров В. А., Шаповалов В. Г., Нарушенная симметрия и магнитоупругие эффекты в ферро- и антиферромагнетиках, «УФН», 1983, т. 140, с. 429. А. К. Засядкин.

**МАГНИТОФОНОННЫЙ РЕЗОНАНС** — резонансное поглощение или испускание фононов определ. частоты носителями заряда (в частности, электронами) в полупроводнике, вызывающее переходы электронов между уровнями Ландау в пост. магн. поле (см. *Ландау уровни*). М. р. проявляется в виде осцилляций проводимости и др. кинетич. характеристик в магн. поле. М. р. предсказан в 1961 В. Л. Гуревичем, Ю. А. Фирсовым [1]. Экспериментально обнаружен С. Пури (S. Puri) и Т. Джебеллом (Th. Geballe) (1963), а также С. С. Шалтым, Р. В. Парфеньевым, В. М. Муздоба [2].

Подобно Шубникова — де Хааза эффекту М. р. связан с осцилляциями плотности электронных состояний в магн. поле как функции энергии  $\mathcal{E}(\mathcal{E})$  [3, 4] (см. *Плотность состояний*, *Квантовые осцилляции* в магнитном поле). Однако в отличие от эффекта Шубникова — де Хааза для М. р. существенно изменение характера рассеяния электронов в магн. поле, к-рое, как и немозо-

говая зависимость плотности состояний от энергии, является следствием квантования электронного спектра (орбитального квантования). Магн. поле как бы «собирает» состояния, равномерно распределённые по зоне, в дискретные подзоны Ландау. Магнитофононные осцилляции проводимости связаны с неупругим рассеянием электронов, когда изменение энергии электрона  $\Delta \mathcal{E} > kT$  (при отсутствии вырождения электронного газа) или больше размытия уровня Ферми (в случае вырождения). Это имеет место, напр., при взаимодействии электронов с оптич. фононами в области низких темп-р (см. *Колебания кристаллической решётки*). Когда энергия оптич. фонона  $\hbar\omega_0$  совпадает с расстоянием между краями к.-л. двух подзон Ландау  $N$  и  $N'$ , т. е.  $\hbar\omega_0 = \mathcal{E}_N - \mathcal{E}_{N'}$ , то ср. вероятность рассеяния электрона возрастает и в зависимости кинетич. коэф. от магн. поля появляется максимум (резонанс).

М. р. сходен с явлением *циклотронного резонанса* — в обоих случаях имеют место переходы с изменением энергии электрона. Однако в отличие от *циклотронного резонанса* М. р. — резонанс внутренний: резонансное условие достигается, когда частота собств. колебаний кристаллич. решётки  $\omega_0$  кратна частоте  $\omega_c$  обращения электрона в магн. поле  $H$  (*циклотронной частоте*).

Теоретич. рассмотрение показывает, что для невырожденной параболич. зоны (см. *Зонная теория*) условие М. р. имеет вид:

$$\hbar\omega_0 = n\hbar\omega_c = \frac{n\hbar e H}{mc}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  — предельная частота длинноволновых оптич. фононов,  $m$  — *эффективная масса* электрона,  $e$  — его заряд,  $n$  — целое число. Из (1) следует, что осцилляции периодичны по  $1/H$ , с периодом

$$\Delta(1/H) = e/m\omega_0 c, \quad (2)$$

к-рый не зависит от концентрации электронов. Осн. причиной осцилляций кинетич. коэффициентов является обращение в  $\infty$  функции плотности состояний  $\mathcal{E}(\mathcal{E})$  электронов в магн. поле и уда каждой зоны Ландау. Когда эти сингулярные точки (в зонах  $N$  и  $N'$ ) разделены по энергии на величину, равную  $\hbar\omega_0$ , возникает скачкообразное изменение числа актов электрон-фононного рассеяния и связанные с ней осцилляции всех кинетич. коэффициентов.

В *многодолинных полупроводниках* типа Ge возможен М. р., обусловленный рассеянием электронов, сопровождающимся переходом их из одной долины в другую [3]. В этом случае в ф-ле (1) в качестве  $\omega_0$  фигурирует частота  $\omega_c$ -фонона, осуществляющего это рассеяние.

Если при рассеянии на фононах меняется спин электрона (при достаточно сильной спин-орбитальной связи), то возникает т. п. спин-магнитофононный резонанс [5]. Внешние он обнаружен у  $n$ -InAs [6]. Условие его наблюдения (для параболич. зоны) имеет вид:

$$\hbar\omega_0 \pm g\mu_B H = n\hbar\omega_c, \quad (3)$$

где  $\mu_B$  — *магнетон* Бора,  $g$  — *фактор* спинового расщепления электронных уровней,  $n$  — целое число.

М. р. — афф. метод изучения зонной структуры твёрдого тела и электрон-фононного взаимодействия в полупроводниках.

Лит.: 1) Гуревич В. Л., Фирсов Ю. А., К теории электропроводности полупроводников в магнитном поле, «ЖЭТФ», 1961, т. 40, с. 169; 2) Шалты С. С., Парфеньев Р. В., Муздоба В. М., Экспериментальное подтверждение нового типа осцилляций поперечного магнетосопротивления, «ФТТ», 1964, т. 6, с. 647; 3) Дидильковская И. М., Электроны и дырки в полупроводниках, М., 1972; 4) Парфеньев Р. В. и др., Магнитофононный резонанс в полупроводниках, «УФН», 1974, т. 112, с. 3; 5) Павлов С. Т., Фирсов Ю. А., Спин-магнитофононный резонанс и осцилляции магнетосопротивления в полупроводниках, «ЖЭТФ», 1965, т. 49, с. 1664; 6) Аксельрод И. М., Дидильковская И. М., Спин-магнитофононные и магнитофононные осцилляции магнетосопротивления в  $n$ -InAs, «Испытия в ЖЭТФ», 1966, т. 4, с. 205. И. М. Цыбыловский.

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ — возникновение в диэлектрик кристалле намагниченности  $m$ , индуцированной электрич. полем  $E$ , или поляризации  $p$ , индуцированной магн. полем  $H$ . М. э. — результат взаимодействия двух подсистем ионного кристалла: электрической, состоящей из заряд. ионов, и магнитной — совокупности нескомпенсиров. спиновых магн. моментов ионов. Полное феноменол. описание всех возможных магнитоэлектрич. взаимодействий может быть выполнено на основе термодинамики. теория *Фейнмана* переходов 2-го рода Ландау. М. э. чаще всего наблюдается в антиферромагн. кристаллах, для к-рых *термодинамический потенциал*  $\Phi$  есть ф-ция проекций векторов: намагниченности  $m$ , антиферромагнетизма  $l$  и вектора  $p$  — изменения электрич. поляризации, вызванного внеш. полями  $E$  и  $H$  и (или) переходом в магнитоупорядоченное состояние. Для однодоменных кристаллов, т. е. таких, в к-рых векторы  $m$ ,  $l$  и  $p$  имеют одинаковую величину и одинаковое направление во всех элементарных ячейках кристалла, связанная с М. э. часть потенциала записывается в виде разложения по смешанным произведениям проекций этих векторов. Из числа всех возможных смешанных произведений вида  $lmp$ ,  $lmp^2$ ,  $m^2p$ ,  $l^2p$ ,  $l^2p^2$  и т. д. в  $\Phi$  входят лишь те, к-рые инвариантны при всех преобразованиях группы симметрии парамагн. фазы конкретного кристалла. Условия устойчивости состояния:  $\partial\Phi/\partial m = 0$  и  $\partial\Phi/\partial p = 0$ , — позволяют найти равновесные значения  $m$  и  $p$ , причём М. э. возможен, если  $m(E) \neq 0$  и (или)  $p(H) \neq 0$ . Вид слагаемых в ф-циях  $m(E)$  и  $p(H)$  зависит от того, с какими членами в разложении  $\Phi$  они связаны, при этом те из слагаемых, к-рые содержат проекции  $l$ , появляются только для кристаллов, обладающих *магнитной атомной структурой*.

Наиб. известен т. н. л и н е й н ы й М. э., возникающий в результате взаимодействий типа  $lmp$ , к-рые приводят к линейной связи вида  $p_i = \alpha_{ij}H_j$ ;  $m_j = \alpha_{ij}E_i$ , где  $\alpha_{ij}$  — компоненты тензора М. э., пропорциональные проекции вектора (здесь и далее суммирование осуществляется по повторяющимся индексам).

В однодоменном кристалле направление  $l$  задано и взаимная ориентация как  $m(E)$  и  $E$ , так и  $p(H)$  и  $H$  полностью определяется величинами  $\alpha_{ij}$ . Изменение направления  $l$  на  $180^\circ$  соответствует др. магн. домену, в к-ром при неизменных относительно кристалла направлениях  $E$  и  $H$  векторы  $m(E)$  и  $p(H)$  будут направлены в противоположную сторону. Это обстоятельство используется в эксперименте для получения однодоменного состояния. Кристалл охлаждается ниже точки магн. перехода  $T_N$  (см. *Немая точка*) в присутствии пост. полей  $E$  и  $H$ , ориентированных так, чтобы вдоль направлений этих полей  $m(E) \neq 0$  и  $p(H) \neq 0$ . В процессе перехода кристалла в магнитоупорядоченное состояние магнитоэлектрич. взаимодействия реализуют во всём объёме кристалла единственный магнитный домен, соответствующий минимуму термодинамич. потенциала  $\Phi$ .

Линейный М. э. обнаружен в 1960 (Д. Н. Астров) в кристалле оксида хрома  $Cr_2O_3$ , элементарная ячейка к-рого показана на рис. 1, а. Для  $Cr_2O_3$   $m_2 = \alpha_2 E_2$ ,  $p_2 = \alpha_2 H_2$ ,  $m_1 = \alpha_1 E_1$ ,  $p_1 = \alpha_1 H_1$ , где индекс 1 обозначает величины в базисной плоскости кристалла. При переходе к другому домену (рис. 1, б) изменяются знаки  $\alpha_2$  и  $\alpha_1$ , однако указать, какому именно домену какой знак соответствует, невозможно.

В сегнетоэлектрич. боратах — кристаллах с общей ф-лой  $M_3B_7O_{13}X$  ( $M$  — Co, Ni, Fe, Mn;  $X$  — Cl, Br, I) при  $T < T_N < T_C$  (*Кюри точке*) также наблюдается линейный М. э., к-рый, в отличие от М. э. в  $Cr_2O_3$ , описывается как диагональными, так и недиагональными компонентами тензора  $\alpha_{ij}$ .

Известно неск. десятков антиферромагнетиков, в к-рых возможен и наблюдается линейный М. э. с величиной  $\alpha$  в пределах от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$  (ТрЮР).

Н е л и н е й н ы й М. э. возникает в результате магнитоэлектрич. взаимодействий вида  $l^2p^2$  и  $lmp^2$ , к-рые приводят к квадратичным зависимостям соответственно по  $H$  и  $E$ :  $p_i = \gamma_{ijk}H_jH_k$ ,  $m_j = \beta_{ijk}E_iE_k$ .

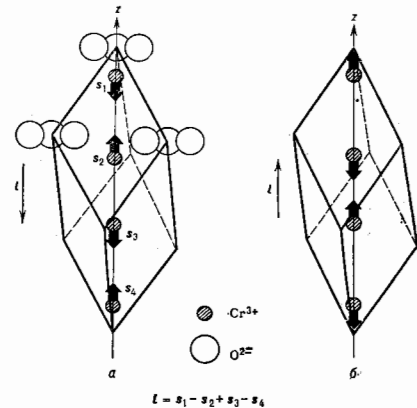


Рис. 1. Элементарная магнитная ячейка антиферромагнетика  $Cr_2O_3$ ; а и б — направления магнитных моментов  $s_1, s_2, s_3, s_4$  ионов в доменах с противоположно ориентированными векторами антиферромагнетизма  $l$ .

Первый из них возможен по всем кристаллах без центра симметрии в парамагн. фазе при  $T > T_N$  и впервые наблюдался в  $NiSO_4 \cdot 6H_2O$  с  $\gamma \sim 10^{-11}$ . Второй возможен только в магнитоупорядоченных кристаллах и наблюдается, напр., в веществах с общей ф-лой  $RFe_3O_{12}$  и  $RFeO_3$  ( $R$  — редкоземельный ион) с  $\beta \sim 10^{-12} - 10^{-2}$ . *Наконец, взаимодействия вида  $p^2$  в кристаллах со слабым ферромагнетизмом* (напр., в Со—I-борате) обуславливают как линейный, так и нелинейный М. э.

М. э. удобно наблюдать динамич. методом, прикладывая к кристаллу переменные поля  $\vec{E}$  или  $\vec{H}$  на частоте  $f$  и измеряя индуцированные ими намагниченность  $m$  или поляризацию  $p$ . Селективная техника обеспечивает достаточно высокую чувствительность даже при измерении слабых квадратичных М. э. в полях  $E$  и  $H$  с амплитудой много меньше той, к-рая может изменить доменную структуру. В динамич. методе линейному М. э. соответствует сигнал на той же частоте  $f$ , а квадратичному на частоте  $2f$ . При наблюдениях квадратичных М. э. можно прикладывать к кристаллу одновременно как переменные  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , так и пост. поля  $E_0$  и  $H_0$ . Тогда  $p = \gamma \vec{H}_0 E_0$  и  $m = \beta \vec{E}_0 E_0$ , т. е. зависимости  $p(H)$  и  $m(E)$  будут линейными на той же частоте, что и частота  $\vec{H}$  и  $\vec{E}$ . В этом случае М. э. можно рассматривать как линейный, индуцированный пост. полем  $H_0$  или  $E_0$ .

Проявления магнитоэлектрич. взаимодействия не ограничиваются М. э. Так, при наличии в  $\Phi$  членов вида  $lmp^2$  и  $m^2p$  парамагн. восприимчивость  $\chi = \partial^2\Phi/\partial m^2$  и поляризуемость  $\kappa = \partial^2\Phi/\partial p^2$  оказываются зависящими линейно от полей  $E$  и  $H$  соответственно. Зависимость  $\kappa(H)$  наблюдалась экспериментально в кристалле  $DyFeO_3$ . Член вида  $p^2$  обуславливает появление поляризации  $p \sim I^2$  при переходе кристалла в магнитоупорядоченное состояние. *Наконец, член вида  $p^2$  приводит к излому на кривой температурной*

зависимости диэлектрич. проницаемости  $\epsilon(T)$  при  $T = T_C$  (ВаМнФ<sub>2</sub>) и  $\chi(T)$  в точке Кюри при  $T_C < T_N$ . Магнитоэлектрич. взаимодействия могут вызвать поляризацию эл.-магн. волн при их отражении или преломлении кристаллами, обладающими М. з., вызывать параметрич. возбуждение спиновых волн в сегнетомагнетиках под действием поля  $E$  высокой частоты или поглощение переменного магн. поля на резонансных частотах элетрич. дипольной структуры.

Термодинамич. теория, позволяющая найти вид потенциала  $\Phi$  для кристалла с известной симметрией, не даёт никаких сведений ни о величинах констант, описывающих М. з., ни о природе микроскопич. сил, ответственных за его проявление. При изучении механизма М. з. приходится использовать модельные представления, а имеющаяся «микроскопическая» теория носит в основном качеств. характер. Так, описание зависимости  $\alpha_i(T)$  в  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (рис. 2) удалось получить на основе модели о сближении ионов  $\text{Cr}^{3+}$  принадлежащих одной магн. подрешётке, с ионами  $\text{O}^{2-}$  и удалении от них ионов  $\text{Cr}^{3+}$  другой подрешётки под действием поля  $E$ , что приводит к изменению изотропного косвенного обменного взаимодействия в подрешётках. В результате намагниченности становятся равными и появляется намагниченность кристалла в целом. Эта же модель может быть применена и к др. кристаллам, обладающим М. з., большинство из к-рых содержат кислород.

При наличии на кристалл достаточно больших полей  $E$  и  $H$  в нём возможны скачкообразные изменения  $m(E)$  и  $\rho(H)$ , связанные с переходом от одного домена к другому. Так, в Ni-1-боратите при увеличении магн. поля, направленного перпендикулярно вектору спонтанной намагниченности, в точке  $H_c \approx 0,5$  Тл происходит перебор этого вектора на  $90^\circ$  и вектора спонтанной поляризации на  $180^\circ$  (рис. 3). Внеш. элетрич. поле может в свою очередь изменить направление  $\rho$  на  $180^\circ$  с одновремен. перебором  $m$  на  $90^\circ$ . В  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  резкое изменение знака М. з., связанное с переходом от одного домена к другому (переклечение доменов), наблюдается при одновремен. наличии достаточно сильных полей  $E_z$  и  $H_x$ .

Рис. 3. Изменение ориентации векторов спонтанной намагниченности  $m$  и поляризации  $\rho$  в Ni-1-боратите при достижении внешнего магнитным полем критического значения  $H_c$ .

Синтез монокристаллич. веществ, как правило, очень труден, что препятствует восторженному изучению М. з., однако его простая регистрация возможна в порошках и поликристаллах, где величина  $\alpha$  достигает  $\approx 30\%$  от эл. значения для монокристалла. Охлажденные поликристаллич. образцы ниже  $T_N$  в полях  $E$  и  $H$  создают избыток доменов одного типа и, следовательно, макроскопич. намагниченность таких образцов.

Все возможные классы магнитной симметрии, допускающиеся М. з., известны. Экспериментально изученные вещества относятся только к части этих классов, и лишь для неск. веществ получено полное согласие между результатами измерений и предсказаниями теории. Прямое определение магн. симметрии метода-

ми нейтроннографии часто затруднено. Исследование М. з., конкретные проявления  $\chi$ -роуго зависят от магн. симметрии, в ряде случаев позволяет дополнить нейтроннографию, данные или даже определить магн. атомную структуру независимо, а также получить сведения об эл. изменении, напр. при ориентационном фазовом переходе антиферромагнетика в сильный магн. поле (спин-фазовый переход).

Практич. применения М. з. (магн. память, фазоразделители, затворы, неэвальные и переключающие элементы в оптике и т. д.) возможны, однако по одно из подобных устройств не было реализовано в связи с отсутствием монокристаллич. материалов высокого качества.

Лит.: O'Dell T. H., The electrodynamic of magnetoelectric media, *Amst.*—L., 1970; Magnetolectric interaction phenomena in crystals, ed. by A. J. Freeman, H. Schmid, L.—[a.o.], 1973; Смирновский В. Г. А., Чуприков И. Е., Сегнетомагнетизм, «УФН», 1982, т. 137, в. 3, с. 445; Веневцев Ю. Н., Гагулин В. В., Любимов В. И., Сегнетомагнетизм, М., 1982.

МАГНИОН — квазичастица, соответствующая кванту спиновых волн в магнитоупорядоченных системах. М. по отношению к спиновым колебаниям играет ту же роль, что и фонон — к колебаниям кристаллической решетки. Энергетич. спектр М. имеет вид  $\hbar\omega = \hbar\omega(k)$ , где  $\omega(k)$  — закон дисперсии или зависимость частоты спиновых волн от их квазиимпульса вектора  $k$ , квазиимпульс М.  $p = \hbar k$ . Время жизни М. определяется затуханием спиновых волн, и только в случае слабого затухания можно говорить о М. как о хорошо выраженных квазичастицах. М. являются бозонами. В тепловом равновесии химический потенциал М. равен 0, что и определяет зависимость числа М. в системе от темп-ры. Когда число М. в системе мало, напр. при низких темп-рах, диссипативные и кинетич. процессы в магн. подсистеме (напр., магн. релаксация, спиновая диффузия) удобно формулировать в рамках теории рассеяния для столкновений М. друг с другом и др. квазичастицами твердого тела. При этом магн. динамику системы можно определять на основе кинетич. ур-ния Больцмана для ф-ции распределения М. В ферромагнетиках М. иногда наз. ферромагнонами.

М. наз. также кванты специфич. спиновых волн в ферми-жидкости (см. *Правой звук*). В парамагнетиках с сильным магнитным взаимодействием иногда используется термин «парамагноны» для обозначения спиновых флуктуаций в представлениях затухающих спиновых волн. По аналогии с фононами М. без цели (или с малой целью) в энергетич. спектре в области малых  $k$  наз. часто акустическими (как правило, при линейном законе дисперсии, как в антиферромагнетиках), а в случае большой цели — оптическими.

Лит. см. при ст. *Спиновые волны*. А. В. Мейерович. МАГНУСА РАЗЛОЖЕНИЕ — решение дифференц. ур-ния для оператора временной эволюции в экспоненц. форме.

Во взаимодействии представлении оператор временной эволюции  $\hat{S}(t, t')$  произвольной квантовой системы удовлетворяет дифференц. ур-нию

$$i\hbar \frac{\partial \hat{S}(t, t')}{\partial t} = \hat{W}(t) \hat{S}(t, t') \quad (1)$$

с граничным условием  $\hat{S}(t, t) = \hat{I}$ . Здесь  $\hat{W}(t)$  — оператор взаимодействия системы с внеш. полем  $\hat{V}(t)$ , записанный в представлении взаимодействия:

$$\hat{W}(t) = \exp\left(\frac{i}{\hbar} \hat{H}_0 t\right) \hat{V}(t) \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \hat{H}_0 t\right),$$

$\hat{H}_0$  — невозмущённый гамильтониан ( $\hat{I}$  — единичный оператор). В общем случае операторы  $\hat{W}(t)$ , являющиеся в разные моменты времени, не коммутируют между собой и ур-ние (1) не интегрируется так же просто, как в классич. физике. Решение (1) может быть представлено в виде экспоненциального М. р. [1—3]:

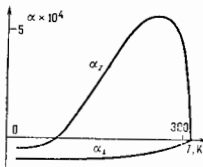


Рис. 2. Температурные зависимости  $\alpha_1(T)$  и  $\alpha_2(T)$  для антиферромагнетика  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

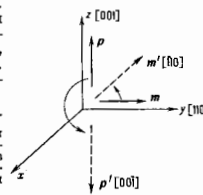


Рис. 3. Изменение ориентации векторов спонтанной намагниченности  $m$  и поляризации  $\rho$  в Ni-1-боратите при достижении внешнего магнитным полем критического значения  $H_c$ .

$$\hat{S}(t, t') = \exp\left(\sum_{n=1}^{\infty} \hat{\lambda}_n\right), \quad (2)$$

где

$$\hat{\lambda}_1 = -\frac{i}{\hbar} \int_{t'}^t \hat{W}(t) dt,$$

$$\hat{\lambda}_2 = \frac{i}{2} \left(-\frac{i}{\hbar}\right)^2 \int_{t'}^t dt_1 \int_{t'}^{t_1} dt_2 [\hat{W}(t_1), \hat{W}(t_2)],$$

$$\hat{\lambda}_3 = \frac{i}{6} \left(-\frac{i}{\hbar}\right)^3 \int_{t'}^t dt_1 \int_{t'}^{t_1} dt_2 \int_{t'}^{t_2} dt_3 \left\{ [\hat{W}(t_1), [\hat{W}(t_2), \hat{W}(t_3)]] + \right. \\ \left. + [[\hat{W}(t_1), \hat{W}(t_2)], \hat{W}(t_3)] \right\}; \dots \quad (3)$$

Операторы  $\hat{\lambda}_n$  представляют собой  $n$ -кратные интегралы от  $(n-1)$ -кратных коммутаторов операторов  $\hat{W}(t)$ , взятых в разные моменты времени. В век-рых случай ряд в экспоненте (2) обрывается и оператор временной эволюции записывается в конечном виде. Так происходит, напр., в задаче об эволюции гармонич. осциллятора, на к-рый действует произвольная внеш. сила [4], и в задаче об эволюции в поле, линейном по координатам  $r$  и импульсам  $p$  произвольной квантовой системы с гамильтонианом, квадратичным по  $r$  и  $p$  [5]. М. р. используется при построении теории везаанных возмущений в процессах «встряска» типа рассеяния (см. *Внезапных возмущений метод*). В нуле-вом порядке по параметру «мгновенности»  $\omega \ll 1$  ( $\tau$  — характерное время взаимодействия,  $\omega$  — типич-ные собств. значения невозмущённого гамильтониана) оператор временной эволюции отличается от (2) заме-ной в  $\hat{\lambda}_n$  (ф-лы (3))  $\hat{W}(t)$  на

$$\hat{W}_0(t) = \exp\left(\frac{i}{\hbar} H_0 t_0\right) \hat{W}(t) \exp\left(-\frac{i}{\hbar} H_0 t_0\right),$$

где  $t_0$  — момент «встряска».

М. р. удобно для построения реал. рода унитарных теорий возмущений, т. к. ввиду эрмитовости опера-торов  $\hat{\lambda}_n$  любой способ обрывания бесконечного ряда в экспоненте (2) не нарушает унитарности оператора эволюции  $\hat{S}(t, t')$ .

Матем. структура операторов  $\hat{W}(t)$  или  $\hat{W}_0(t)$  допус-кает иногда суммирование бесконечного числа членов М. р. Как правило, это происходит в тех случаях, когда  $\hat{W}(t)$  [а чаще  $\hat{W}_0(t)$ ] представляет собой линей-ную комбинацию генераторов  $L_j$  конечной  $L$  алгебры с коэффициентами  $a_j(t)$  — линейно-независимыми ф-ция-ми времени:

$$\hat{W}(t) = \sum_{j=1}^m a_j(t) L_j,$$

$m \leq n$ ,  $n$  — размерность алгебры Ли. Наиб. есте-ственное и простое в матем. отношении решение диффе-ренц. ур-ния для оператора эволюции, альтернативное М. р., записывается в конечной форме в виде произведе-ния нескольких (в зависимости от числа генераторов группы) экспоненц. операторов

$$\hat{S}(t, t') = \prod_{j=1}^n \exp\{g_j(t) L_j\}.$$

Такой подход, эквивалентный суммированию членов М. р., наз. процедурой временного упорядочивания Воя — Нормана [6]. Независимые ф-ции времени  $g_j(t)$  удовлетворяют системе дифференц. ур-ний вида

$$\frac{dg_j(t)}{dt} = \sum_{k=1}^n \eta_{jk} a_k(t)$$

с граничными условиями  $g_j(t') = 0$ ;  $\eta_{jk}$  — величьеые ф-кции от  $g_j(t)$ . Решения этой системы исследуются как для конкретных физич. задач теории излучения и квантовой оптики, так и для моделей, включающих алгебры Ли  $SU(1,1)$ ,  $SU(2)$ ,  $SU(3)$  и др.

Лит.: 1) М а г н у с М., On the exponential solution of differential equations for a linear operator, «Comm. Pure and Appl. Math.», 1954, v. 7, p. 649; 2) Wilcox R. M., Exponential operators and parameter differentiation in quantum physics, J. Math. Phys., 1967, v. 8, № 4, p. 862; 3) Р е с ч у к а в П. В., Litvin J. C., On the exponential form of time displacement operators in quantum mechanics, J. Chem. Phys., 1966, v. 44, № 10, p. 3897; 4) Д у х н е А. М., Ю д и н Г. Л., «Встраивание» квантовой системы и характер стимулированных их пере-ходов, «УФН», 1978, т. 123, в. 5, с. 377; 5) Ю д и н Г. Л., Куз-носовская ионизация атома быстрым многозарядным ионом, «ЖЭТФ», 1981, т. 80, в. 3, с. 1026; 6) Wei J. W., Nozaki A. E., Lie algebraic solution of linear differential equations, J. Math. Phys., 1963, v. 4, № 4, p. 575. Г. Л. Ю д и н.

**МАГНУСА ЭФФЕКТ** — возникновение поперечной силы, действующей на тело, вращающееся в набегавшем на него потоке жидкости (газа); открыт Г. Г. Магнусом (H. G. Magnus) в 1852. Напр., если вращающийся бес-конечно длинный круговой цилиндр обтекает безвихре-вый поток, направленный перпендикулярно его обра-зующим, то вследствие вязкости жидкости скорость течения со стороны, где направления скорости  $v$  пото-ка и вращения цилиндра совпадают (рис.), увеличи-вается, а на другой уменьшается, т. е. появляется по-перечная сила  $Y$ ; её величина определяется *Жуковско-го теоремой*. Аналогич-ная сила возникает и при набегании пото-ка на вращающийся шар, чем объясня-ется вращательный полёт закручен-ного теннисного или футбольного мяча.

Направлена попереч-ная сила всегда с той стороны вращающегося тела, на к-рой направление вращения и направление потока противоположны, к той стороне, на к-рой эти направ-ления совпадают.

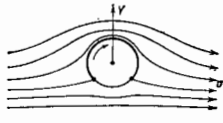
Лит.: П р а н т а т Л., Гидроаэромеханика, пер. с нем., 2 изд., М., 1951; Х а в и л в С. Э., Физические основы механики, 2 изд., М., 1971.

**МАДЖИ — РИГИ — ЛЕДУКА ЭФФЕКТ** — измене-ние теплопроводности проводника (металла, полупро-водника, полуметалла) под действием магн. поля. От-крыт Дж. А. Маджи (G. A. Maggi), А. Риги (A. Righi) и независимо от них С. А. Ледюком (S. A. Leduc) в 1887 на Вн. Относится к продольным *термагнитным явле-ниям*. М. — Р. — Л. э. обусловлен искривлением траекторий носителей тока в магн. поле под действием *Лоренца сил*, что соответствует уменьшению эф-ф. длины свободного пробега носителей явряд и приво-дит к изменению электронной части теплопроводности. В полупроводниках величина М. — Р. — Л. э. значи-тельно больше, чем в металлах. Измерение М. — Р. — Л. э. позволяет отделять электронную часть теплопро-водности проводника от решётчатой.

Лит.: Ц и д и н к о в с к и й И. М., Термагнитные явле-ния в полупроводниках, М., 1960; А с к е р о в Б. М., Кинети-ческие эффекты в полупроводниках, Л., 1970; е го ж е, Элек-тронные явления переноса в полупроводниках, М., 1985. — Э. М. Штальман.

**МАЗЕР** [Maser — аббревиатура от англ. слов: Micro-wave Amplification by Stimulated Emission of Radiation — усиление микроволн (СВЧ) при помощи инду-цированного излучения] — квантовые генераторы и усилители радиодиапазона. См. *Квантовая электроника. Квантовый усилитель*.

**МАЗЕР НА ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ** (МЦР) — СВЧ-генератор (усилитель), в к-ром исполь-зуется вынужденное излучение пучка электронов, дви-жущихся по винтовым траекториям в однородном магн. поле (или по трохлоидальным траекториям в скрещен-



ных электрическом и магнитном полях). При движении электронов в магн. поле  $H_0$  по винтовым траекториям взаимодействие электронов с ал.-магн. волной, распространяющейся вдоль магнитного поля  $E = E_0 \exp i(\omega t - k z)$ , происходит при выполнении условия **циклотронного резонанса** (свихронизма), к-рое с учётом доплеровской поправки (см. *Доплера эффект*) имеет вид

$$\omega - k_z v_{\parallel} \approx s \omega_c; \quad s = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Здесь  $v_{\parallel}$  — поступат. скорость электрона вдоль магн. поля  $H_0$ ,  $\omega_c$  — частота волны,  $k_{\parallel}$  — компонента волнового вектора  $k$  вдоль  $H_0$ ,  $\omega_c = e H_0 / c$  — циклотронная частота,  $\mathcal{E}$  — полная энергия,  $e$  — заряд электрона. Из (1) ясно, что при  $s \geq 1$  в МЦР отсутствует необходимость замедлять волну. Именно это обстоятельство, сближающее МЦР с **квантовыми генераторами**, и определяет его преимущества на миллиметровых и субмиллиметровых волнах перед традиц. СВЧ-генераторами — **магнетроном**, **лампой бегущей волны** (ЛБВ) и др., где для осуществления синхронизма необходимо движение электронов **вблизи замедляющей системы**.

Как и в др. классич. СВЧ генераторах, в МЦР преобразование энергии стационарного электронного пучка в излучение оказывается возможным благодаря группировке частиц полем «затраховочной» волны. Образующиеся электронные сгустки усиливают первичную волну (циклотронная неустойчивость). Такой индуктив. процесс происходит в МЦР вследствие: 1) зависимости  $\omega_c$  от энергии электрона  $\mathcal{E}$  (неизоэнергетичность вращения), к-рая приводит к азимутальной группировке частиц, меняющих свою энергию в процессе взаимодействия с волной; 2) различия поступат. смещений, к-рые приобретает электроны, понавшие в разные фазы пространственно неоднородной волны; этот механизм приводит к продольной (вдоль  $H_0$ ) группировке частиц.

При квантовой интерпретации этим механизмам отвечают: неэквидистантность энергетич. уровней электрона в магн. поле (см. *Ландау уровни*) и «отдача» при излучении фотона, также ведущая к различию частот волн, испускаемых и поглощаемых электроном. Первый из этих механизмов специфичен и имеет принципиально релятивистскую природу, а второй более универсален и кроме МЦР действует во многих СВЧ-генераторах, в частности в ЛБВ.

**Классическая интерпретация.** Рассмотрим взаимодействие электронов, первоначально равномерно распределённых на циклотронной окружности, с электрич. полем  $E$  волны, имеющим компоненту, вращающуюся с частотой, равной циклотронной частоте электронов (рис. 1, а). В результате взаимодействия циклотронная частота электрона Б, отбирающего энергию у волны, уменьшается и он начинает вращаться медленнее, а циклотронная частота электрона В, отдающего энергию волне, возрастает и он вращается быстрее. Поэтому вблизи электрона А, вращающегося с неизменяющейся частотой, образуется сгусток электронов. Для того чтобы электроны в среднем отдавали свою энергию волне, сгусток должен перемещаться синхронно с тормозящей фазой волны. Для этого частота вращения волны (с учётом доплеровской поправки  $\omega - k_z v_{\parallel}$ ) должна не только превышать исходную циклотронную частоту электронов.

**Квантовая интерпретация.** Пусть в исходном состоянии все электроны находятся на  $p$ -м уровне Ландау (рис. 1, б). Поскольку неэквидистантность уровней невелика, волна может вызывать переходы с  $p$ -го как на более низкие (вынужденное излучение), так и на более высокие (резонансное поглощение) уровни. Для преобладания излучения над поглощением интенсивность спектра волны на частоте  $\omega_{p,p-1}$  должна быть выше, чем на частоте  $\omega_{p,p+1}$ , что и реализуется при  $\omega \gtrsim \omega_c$ .

Вследствие малой неэквидистантности электроны способны последовательно переходить на всё более низкие уровни, испуская много квантов.

Как и для приборов, основанных на вынужденном излучении электронов, движущихся по прямолиней-

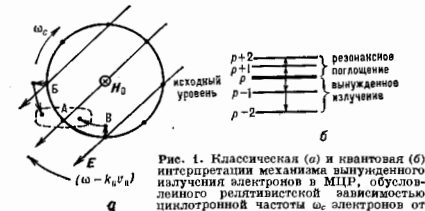


Рис. 1. Классическая (а) и квантовая (б) интерпретации механизма вынужденного излучения электронов в МЦР, обусловленного релятивистской зависимостью циклотронной частоты  $\omega_c$  электронов от их энергии  $\mathcal{E}$ .

ных траекториям, для МЦР существует много вариантов построения как генераторов (МЦР-монотрон, где обратная связь обеспечивается отражением волн от концов резонатора; МЦР со встречной волной — аналог лампы обратной волны и др.), так и усилителей веш. сигнала (МЦР-ЛБВ и МЦР-кларит).

**Гиротрон.** Из многочисл. вариантов МЦР при слабorelatивистских энергиях электронов наиб. распространены получили генераторные и усилительные разновидности гиротрона (рис. 2). В гиротроне электроны

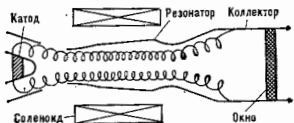


Рис. 2. Схема гиротрона — автогенератора.

слабо взаимодействуют с полем нерегулярного волновода на частоте, близкой к критической, когда фазовая скорость волны  $\omega/k_z \gg c$ . В таких условиях доплеровская поправка к частоте, равная  $k_z v_{\parallel}$ , мала, благодаря чему снижается до минимума уширение спектральной линии (вызванное разбросом поступат. скоростей электронов) и тем самым повышается электронный кнд. Отсутствие замедляющей системы и возможность использования открытых резонаторов делают гиротроны мощными генераторами и усилителями диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Согласно условию (1), длина волны слабorelatивистского гиротрона, работающего на осн. циклотронном резонансе ( $s = 1$ ), связана с величиной магн. поля соотношением:

$$\lambda (\text{мм}) \approx 107 / H (\text{кЭ}). \quad (2)$$

Отсюда ясно, что для реализации гиротронов КВ-части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов требуются интенсивные магн. поля  $H_0 \sim 100$  кЭ, к-рые обеспечиваются криомагн. системами или импульсными соленоидами.

Гиротроны позволили освоить весь диапазон миллиметровых волн на высоких уровнях мощности ( $\sim 1$  МВт в импульсном и сотни кВт в непрерывном режиме) с кнд  $\sim 30$ —40%. Это делает их перспективными для ряда энергетич. приложений, в частности для нагрева плазмы в установках *управляемого термоядерного синтеза*.

При переходе к релятивистским энергиям электронов эффективность гиротрона уменьшается вследствие сли-



звездообразования при свободном выходе из среды фотонов стока (напр., в сильных мазерах OH 1-го типа при РН-пакаче), за счёт различия темп-р электронов и молекул в ударных волнах, за счёт различия темп-ры газа и радиационной температуры, описывающей интенсивность поля излучения в среде, а также, возможно, по ряду др. причин.

Слабый М. з. весьма обычен в космосе и соответствует оптической толщине  $\tau$  в центре маэровой радиологии ок. 1—3. Сильный М. з. наблюдается лишь на отд. переходах тех молекул, к-рые имеют подходящую для эфф. накачки систему уровней (см., напр., уровни OH на рис.).

Лит.: Космические маэры. Об. ст., пер. с англ., М., 1974; Стрельничий В. С., Космические маэры. «УФН», 1974, т. 113, с. 463; Морав Д. Ж., М. Редноблюдения галактических маэров, в яд.: На первом крае астрофизики, пер. с англ., М., 1979; Капелан С. А., Пикельнер С. Б., Физика межзвездной среды, М., 1979; Удильский Г. М., Молекулы в астрофизике, М., 1983; Вочикарев Н. Г., Основы физики межзвездной среды, М., 1990. Н. Г. Вочикарев.

**МАЙЕРА ДИАГРАММЫ** в статистической физике — способ наглядного представления разложения конфигурац. интеграла для классич. идеального газа по степеням плотности. Статистич. сумму газа, состоящего из  $N$  молекул, можно представить в след. виде:

$$Z_N = \lambda^{-3N} N! (N!)^{-1} \int \dots \int dr_1 \dots dr_N \prod_{i < k} (1 + f_{ik}),$$

где  $f_{ik}$  — *Майера функция*,  $\lambda = (h^3/2\pi m k T)^{1/2}$ ,  $m$  — масса молекулы,  $T$  — темп-ра. М. д. позволяют упростить разложение  $Z_N$  по степеням  $f_{ik}$ .

С каждым членом разложения  $Z_N$  сопоставляют определённую М. д. (граф). Каждой из переменных интегрирования  $r_1, \dots, r_N$  соответствует пронумерованный кружок (вершина графа), а каждому множителю  $f_{ik}$  — линия, соединяющая вершины  $i$  и  $k$ .

Напр., интегралу

$$\lambda^{-9} (6!)^{-1} \int \dots \int dr_1 \dots dr_6 \delta_{12} \delta_{23} \delta_{34} \delta_{45} \delta_{56}$$

отвечает шестивершинная М. д. (рис. 1). Графы, в к-рых нет связей между всеми вершинами, наз. несвязными. Граф на рис. 4 несвязный, он состоит из трёх не связанных между собой графов 1—2—4, 5—6, 3.

В *групповом разложении* давления  $P$  и плотности  $n = N/V$  ( $V$  — объём) по степеням активности  $Z = \lambda^{-3} \exp(\mu/kT)$  ( $\mu$  — хим. потенциал):

$$P = kT \sum_{l=1}^{\infty} b_l z^l, \quad n = \sum_{l=1}^{\infty} l b_l z^l,$$

групповые интегралы  $b_l$ ,

$$b_l = V^{-1} (l!)^{-1} \int \dots \int \prod_{i < j} f_{ij} dr_1 \dots dr_l, (1 \leq i < j \leq l),$$

определяются лишь связными М. д. (рис. 2).

Рис. 2. Диаграммы Майера для групповых интегралов  $b_l$ .

В *вириальном разложении*  $P$  по степеням плотности коэффициенты определяются лишь связными неприводимыми М. д., в к-рых каждая вершина связана с другими более чем одной связью (рис. 3).

Метод М. д., введённый Дж. Майером (J. Mayer) в 1937, был первым диаграммным методом, к-рый ис-

пользовался в теоретич. физике и на к-ром были исследованы общие свойства подобных методов. Позднее диаграммные методы получили широкое распространение

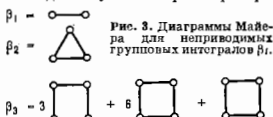


Рис. 3. Диаграммы Майера для групповых интегралов  $\beta_l$ .

в разл. разделах физики, в частности в статистич. механике квантовых систем (см. *Термодинамическая теория возбуждений*) и в квантовой теории поля (см. *Фейнмана диаграммы*).

Лит. см. при ст. *Вириальное разложение*. Д. Н. Зубарев. **МАЙЕРА УРАВНЕНИЕ** — ур-ние, устанавливающее связь между теплоёмкостями при пост. давлении  $C_p$  и пост. объёме  $C_v$  1 кмоль идеального газа:  $C_p - C_v = R$ , где  $R$  — *универсальная постоянная*. Впервые было получено Ю. Р. Майером (J. R. Mayer) в 1842 и ещё до работ Дж. П. Джоуля (J. P. Joule) использовано им для количеств. определения *механического эквивалента теплоты*. Для произвольной массы  $m$  (кг) вещества в состоянии идеального газа М. у. записывается в виде:  $C_p - C_v = (m/\mu)R$ , где  $\mu$  — молекулярная масса газа. М. у. можно получить из общего соотношения  $C_p - C_v = T(\partial V/\partial T)_p(\partial p/\partial T)_V$  (см. *Термодинамика*), если учесть, что для идеального газа справедливо *Клапейрона уравнение*.

Лит.: Сивухин Д. В., *Общий курс физики*, 2 изд., [т. 2], М., 1978.

**МАЙЕРА ФУНКЦИЯ** — функция

$$f_{ik} = \exp(-\beta U(r_{ik})) - 1,$$

где  $\beta = 1/kT$ ,  $T$  — темп-ра,  $U(r_{ik}) = U(|r_i - r_k|)$  — потенциальная энергия взаимодействия молекул.

М. ф. применяется в теории классич. идеальных газов малой плотности при разложении конфигурац. интеграла по степеням малой плотности. М. ф. ограничена и стремится к нулю при  $r_{ik} \rightarrow \infty$  (рис.).

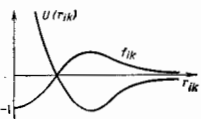


Рис. 4. Сравнение потенциала взаимодействия молекул  $U(r_{ik})$  и функции Майера  $f_{ik}$ .

Кроме того,  $\exp[-\beta \sum_{i < k} U(r_{ik})] = \prod_{i < k} (1 + f_{ik}) \approx$

$$\approx 1 + \sum_{i < k} f_{ik} + \sum_{i < j < k} f_{ij} f_{jk} + \dots$$

Разложение по степеням М. ф. под знаком конфигурац. интеграла соответствует его разложению по степеням плотности (см. *Вириальное разложение*).

Д. Н. Зубарев. **МАЙКЕЛЬСОНА ИНТЕРФЕРОМЕТР** — см. *Интерферометр Майкельсона*.

**МАЙКЕЛЬСОНА ОПЫТ** — опыт, поставленный впервые А. Майкельсоном (A. Michelson) в 1881 с целью измерения влияния движения Земли на скорость света. Отрицат. результат был одним из осн. эксперим. фактов, к-рые легли в основу *относительности теории*.

В физике кон. 19 в. предполагалось, что свет распространяется в нек-рой универсальной мировой среде — *эфире*. При этом ряд явлений (*абберация света*, *Физо опыт*) приводил к заключению, что эфир неподвижен или частично увлекается телами при их движении. Согласно гипотезе неподвижного эфира, можно наблюдать «эфирный ветер» при движении Земли сквозь эфир и скорость света по отношению к Земле должна зависеть от направления светового луча относительно направления её движения в эфире.



М. о. проводился с помощью интерферометра Майкельсона с равными плечами; одно плечо направлялось по движению Земли, другое — перпендикулярно к нему. При повороте этого прибора на  $90^\circ$  разность хода лучей должна менять знак, вследствие чего должна смещаться интерференционная картина. Расчеты показывают, что такое смещение, выраженное в долях ширины интерференционных полос, равно  $\Delta = (2l/\lambda)(v^2/c^2)$ , где  $l$  — длина плеча интерферометра,  $\lambda$  — длина волны применяемого света (желтая линия Na),  $c$  — скорость света в эфире,  $v$  — орбитальная скорость Земли. Т. к. величина  $v/c$  для орбитального движения Земли порядка  $10^{-4}$ , то ожидавшееся смещение очень мало и в первом М. о. составляло всего 0,04. Тем не менее уже на основе этого опыта Майкельсон пришёл к убеждению о неверности гипотез неподвижного эфира.

В дальнейшем М. о. неоднократно повторялся. В опытах Майкельсона и Э. У. Морли (E. W. Morley; 1885—87) интерферометр устанавливался на массивной плите, плавающей в ртути (для плавного вращения). Оптика плеча была доведена до 11 м. При этом ожидавшееся смещение  $\Delta \approx 0,4$ . Измерения подтверждали отрицательный результат М. о. В 1958 в Колумбийском ун-те (США) было ещё раз продемонстрировано отсутствие неподвижного эфира. Пучки излучения двух одинаковых квантовых генераторов микроволн (мазеров) направлялись в противоположные стороны — по движению Земли и против движения — и сравнивались их частоты. С огромной точностью ( $\sim 10^{-9}$  %) было установлено, что частоты остаются одинаковыми, в то время как «эфирный ветер» привёл бы к появлению разницы этих частот на величину, почти в 500 раз превосходящую точность измерений.

В классич. физике отрицательный результат М. о. не может быть понят и согласован с др. явлениями электродинамики движущихся сред. В теории относительности постоянство скорости света для всех инерциальных систем отсчёта принимается как постулат, подтверждаемый большой совокупностью экспериментов.

Лит.: В а в и л о в С. И., Экспериментальные основания теории относительности, Собр. соч. т. 4, М., 1962; Физическая энциклопедия, 1980—1981, М., 1985.

МАЙКЕЛЬСОНА ЭШЕЛОН — многолучевая интерференционный прибор высокой разрешающей силы. Представляет собой набор плоскопараллельных стеклянных или кварцевых пластинок одинаковой толщины, поставленных на оптический контакт так, что их концы образуют ступенчатые лестницы (рис.). Точность изготовления плоскостей пластинок, их параллельность и толщина должны быть порядка  $\approx (1/50)\lambda$ . Толщина пластинок  $t \approx 5$ — $10$  мм, число пластинок  $N$  около 25—30.

Способ образования когерентных пучков в М. э. и его оптич. схема такие же, как у дифракционной решётки. Угл. распределение интенсивности в результирующей интерференционной картине в плоскости дисперсии также определяется произведением двух функций: дифракционной —  $(\sin u/u)^2$  при дифракции на одной ступеньке шириной  $d$  и интерференционной функции  $(\sin Nv/\sin v)^2$ , определяемой интерференцией  $N$  когерентных пучков от всех ступенек М. э.:

$$I = A^2 d^2 (\sin u/u)^2 (\sin Nv/\sin v)^2,$$

где  $A$  — амплитуда падающей на М. э. световой волны. Если  $\alpha$  — угол падения плоской волны,  $\beta$  — угол дифракции, отсчитываемый от нормали к ступеньке (рис.), то  $u = kvd/2$ ,  $v = k(\delta b + vd)/2$ ,  $v = n \sin \alpha + \sin \beta$ ,  $\delta = n \cos \alpha - \cos \beta$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $n$  — показатель преломления материала пластинок М. э.,  $t$  — высота (толщина) ступеньки;  $\delta b + vd = \Delta$  — разность хода между соседними когерентными пучками. Как и в случае дифракц. решётки, направление на интерференц. максимумы определяется из условия  $\Delta = m\lambda$ , где  $m$  — порядок спектра.

В отличие от дифракц. решётки период  $d$  в М. э. много больше длины волны  $\lambda$ , и потому ширина дифракц. максимума функции  $(\sin u/u)^2$  очень мала, а её макс. значение совпадает с направлением на высокий порядок функции  $(\sin Nv/\sin v)^2$ . В этом отношении М. э. эквивалентен дифракц. решётке — эшелетту, работающему с концентрированной энергией в высоких порядках спектра. Обычно М. э. используется в условиях нормального падения  $\alpha = 0$ , а угол  $\beta$  мал.

Для М. э. с  $N = 30$ ,  $t = 1$  см,  $n = 1,5$ ,  $\lambda = 500$  нм рабочий порядок спектра  $m \approx 10^4$ , т. е. очень большой, разрешающая сила велика  $R \approx 3 \cdot 10^8$ , но область дисперсии очень мала  $\Delta \lambda \approx 5 \cdot 10^{-2}$  нм, что является существенным недостатком М. э. и требует предварительной высокой степени монохроматизации исследуемого спектра.

Кроме прозрачных М. э. существуют отражательные М. э., у которых на ступеньки наносится отражающее покрытие и работа ведётся в отражённом свете, обычно они применяются в УФ- и ИК-диапазоне. М. э. используются крайне редко из-за трудности их изготовления.

Лит.: К о р о л е в Ф. А., Спектроскопия высокой разрешающей силы, 1953; Т о л д и н с к и й С., Спектроскопия высокой разрешающей силы, пер. с англ., М., 1955.

МАЙОРАНОВСКАЯ СИСТЕМА — электрически нейтральная элементарная частица, для  $k$ -рой античастица тождественна частице (истинно нейтральная частица). Все известные истинно нейтральные частицы имеют целый спин. На петривальную возможность существования М. ч. со спином  $1/2$  впервые указал в 1937 Э. Майорана (E. Majorana) — т. н. майорановские нейтрино. Экспериментально майорановские нейтрино пока не обнаружены.

Л. А. Капар. МАЙОРОН (символ  $M^0$ ) — гипотетич. нейтральная, псевдоскалярная (со спином 0) и отрицат. внутр. чётностью) частица с нулевой массой, претм. взаимодействующая с нейтрино майорановского типа. М. был введён в теорию в 1980 в работе [1] как *кандидатский бозон*, возникающий при спонтанном нарушении симметрии лептонного числа. В результате этого нарушения нейтрино приобретают массы (становятся майорановскими) и появляются взаимодействия, изменяющие лептонное число на два.

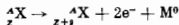
Связь М. с нейтрино описывается членом лагранжиана  $\hbar v_L (v_L)^c M^0 + \text{з. с.}$ , где  $v_L$  — безразмерная константа,  $v_L^c$  — оператор поля левого нейтрино (черта означает дираковский сопряжение, индекс  $c$  — *зарядовое сопряжение*, з. с. — *эрмитово-сопряжённый член*). При испускании или поглощении М. нейтрино переходит в антинейтрино  $\bar{\nu}$ , и наоборот. Взаимодействия М. с заряж. лептонами и кварками сильно подавлены; они возникают в высших порядках теории возмущений и (или) в результате смешивания М. с нейтральными Хиггса бозонами. Из-за аксиальной структуры связей М. обмен М. в веществе приводит, как можно показать, к потенциалу  $V(r) \sim r^{-3}$  с очень малой константой. М. может приобретать малую массу вследствие дополнит. взаимодействий, явно нарушающих лептонное число [2].

Свойства взаимодействий М. существенно зависят от структуры теории, и прежде всего от величины слабого изоспина М.  $I_w$  (см. *Изотопический спин*). В моделях с синглетным М. ( $I_w = 0$ ) [1] все связи М., за исключением связей с правыми (стерильными) нейтри-

во ( $\nu_R$ ), сильно подавлены. Такой  $M$  может ассоциироваться с т. н. видящимся (invisible) аксионом. В моделях с триплетным ( $L_{\nu} = 1$ ) [3]  $M$  непосредственно взаимодействует с левыми нейтрино и предсказываемые эффекты могут быть на уровне чувствительности совр. экспериментов. Наиб. важные процессы с участием  $M$  и их следствия таковы.

1) Майороновы распады нейтрино:  $\nu \rightarrow \nu' + M^0$ , где  $\nu'$  — более лёгкая компонента, могут иметь времена, много меньше возраста Вселенной, и, следовательно, устранив космологич. ограничения на массу нейтрино.

2) Майоронов двойной бета-распад:



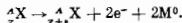
( $M$  испускается виртуальным нейтрино, рождающимся и поглощающимся в ядре) [4]. Отрицат. результаты поиска такого распада ограничивают константу  $\lambda \lesssim 10^{-4}$  [5]. Полулептонные распады  $\lambda$ - и  $K$ -мезонов,  $\lambda(K) \rightarrow l + \nu + M^0$  (где  $l$  — лептон), дают более слабое ограничение:  $\lambda \lesssim 10^{-2}$ .

3) Фоторождение  $M$ :  $\nu + e \rightarrow e + M^0$ , приводит к дополнит. охлаждению звёзд, поскольку  $M$  свободно выходит из их ядер, областей [4]. Наблюдат. данные по красным гигантам и сверхновой SN 1987A с учётом этого обстоятельства дали верхний предел для вакуумного ожидания скалярного поля, нарушающего лептонное число.

4) Майоронный распад  $Z^0$ -бозона:  $Z^0 \rightarrow M^0 + H^0$ , где  $H^0$  — хиггсовский скаляр, в модели триплетного  $M$  при  $m_H \ll m_Z$  ( $m$  — масса) имеет парциальную ширину, вдвое большую, чем ширина нейтринного распада. Результаты измерения полной ширины  $Z^0$  на  $e^+e^-$ -коллайдерах исключают такой дополнит. вклад в ширину, а, значит, и само существование триплетного  $M$ .

5) Аннигиляция нейтрино в  $M$ :  $\nu + \bar{\nu} \rightarrow M^0 + M^0$ , при  $h \gtrsim 10^{-6}$  приводит к частичному или полному исчезновению массивных реликтовых нейтрино. Наряду с аннигиляцией процесс рассеяния  $\nu + M^0 \rightarrow \nu + M^0$  и индуцированные  $\nu$ -распады в плотном веществе,  $\nu \rightarrow \nu + M^0$ , могут существенно повлиять как на динамику гравитат. коллапса звёзд, так и на формирование нейтринного импульса, его энергетику и длительность.

В рамках суперсимметричного обобщения теории (см. *Суперсимметрия*) предложена модель с дублетным  $M$  ( $L_{\nu} = 1/2$ ) [7]. В этом случае  $M$  является суперсимметричным партнёром нейтрино. Майороновые  $\nu$ -распад и двойной бета-распад происходят с участием одновременно двух  $M$ , напр.



Эксперим. наблюдение эффектов, связанных с  $M$ , свидетельствовало бы о ненулевых массах нейтрино, и наоборот, обнаружение у нейтрино масс, превышающих космологич. ограничения, явилось бы указанием на существование  $M$ .

Лит.: 1) Chakashige Y., Mohapatra R. N., Peccei R. D., Spontaneously broken lepton number and cosmological constraints on the neutrino mass spectrum, «Phys. Rev. Lett.», 1980, v. 45, p. 1926; и ж. же, Are the real goldstone bosons associated with broken lepton number?, «Phys. Lett.», 1981, v. 98 B, p. 265; 2) С м и р и в А. О., Несколько тяжёлых нейтрино», «Ядерная физика», 1981, т. 34, в. 6, с. 1547; 3) Gelmini G. B., Roncelloni M., Left-handed neutrino mass scale and spontaneously broken lepton number, «Phys. Lett.», 1981, v. 99 B, p. 447; 4) Georgi H., Glashow S. L., Nussinov S., Unconventional model of neutrino masses, «Nucl. Phys.», 1981, v. 193 B, p. 297; 5) Caldwell D. O. и др., Limits on neutrinoless  $\beta\beta$  decay including that with majoron emission, «Phys. Rev. Lett.», 1987, v. 58, p. 593; 6) Santamaría A., Valle J. W. F., Supersymmetric majoron signatures and solar neutrino oscillations, «Phys. Rev. Lett.», 1988, v. 60, p. 397.

МАКРОСКОПИЧЕСКИЙ РЯД — частный случай *Теория рёда*. МАКРОМОЛЕКУЛА (от греч. makros — большой и molekula) — молекула полимера (высокомолекуляр-

ного соединения), образованная одной, несколькими или многими полимерными цепями — линейными, разветвлёнными или кольцевыми. Каждая полимерная цепь состоит из большого числа ковалентно соединённых мономерных звеньев — групп атомов, также соединённых ковалентными хим. связями. Термин « $M$ » введён Г. Штаудингером (H. Staudinger, 1922), экспериментально установившим тип цепного строения молекул полимеров. Подробнее см. в ст. *Полимеры*.

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ — совокупность явлений, в к-рых характерные особенности квантовой механики непосредственно проявляются в поведении макроскопич. объектов. В большинстве случаев поведение макроскопич. (содержащих большое число атомов) тел с высокой точностью описывается классич. механикой, так что характерная для квантовой механики величина — постоянная Планка  $h$  — не входит в управляющие этим поведением ур-ния. Однако при низких темп-рах существует важный класс вполне макроскопич. экспериментов, в результате к-рых постоянная Планка входит в явном виде и может быть в явн. непосредственно измерена. Б. ч. этих экспериментов связана со *сверхтекучестью* жидкого гелия и *сверхпроводимостью* металлов.

В квантовой механике состояние и движение системы описывается с помощью волновой ф-ции, не имеющей классич. аналога. В рассматриваемых явлениях, однако, волновая ф-ция проявляется как наблюдаемая макроскопич. величина. Это возможно в том случае, когда в системе имеется большое число частиц, находящихся в одном и том же квантовом состоянии.

В матем. аппарате квантовой теории уничтожение и рождение частиц описывается операторами *вторичного квантования*  $\hat{\psi}(r, t)$  и  $\hat{\psi}^\dagger(r, t)$  (где  $r$  — координата,  $t$  — время), удовлетворяющим для частиц, подчиняющихся статистике Бозе — Эйнштейна, перестановочным соотношениям

$$[\hat{\psi}(r, t)\hat{\psi}^\dagger(r', t) - \hat{\psi}^\dagger(r', t)\hat{\psi}(r, t)] = \delta(r-r') \quad (1)$$

$[\delta(r-r')$  — дельта-функция Дирака]. Если в к.-л. квантовом состоянии системы находится много частиц, матричные элементы операторов в левой части равенства велики и некоммутативностью операторов, т. е. правой частью (1), можно пренебречь. Тогда операторы  $\hat{\psi}$  и  $\hat{\psi}^\dagger$  переходят в коммутирующие друг с другом классич. ф-ции координат и времени  $\psi_0(r, t)$  и  $\psi_0^\dagger(r, t)$ . Ф-цию  $\psi_0(r, t)$  можно назвать макроскопич. в н о в о й ф-ц и е й рассматриваемых частиц, и наличие такой ф-ции является свидетельством имеющейся в этом случае макроскопич. *квантовой когерентности*. В простейшем виде такая ситуация реализуется в классич. эл.-магн. поле, к-рое можно рассматривать как совокупность большого числа фотонов, находящихся в близких квантовых состояниях. Однако особенно интересные явления происходят в случае, когда в одном состоянии находится большое число «обыкновенных» частиц, напр. атомов, число к-рых, в отличие от числа фотонов, сохраняется.

Это осуществляется в сверхтекучем  $^4\text{He}$ . При темп-рах ниже темп-ры перехода в гелий происходит *Бозе — Эйнштейна конденсация*, состоящая в том, что конечная доля атомов гелия переходит в низшее (при данных макроскопич. условиях) квантовое состояние. Будучи пропорциональным полному числу атомов в теле, число атомов в конденсате велико, так что, согласно сказанному выше, они описываются классич. «волновой ф-цией конденсата»  $\psi_0(r, t) = |\psi_0| \exp(i\alpha)$ . Для покоящегося гелия  $\psi_0$  — просто постоянная. Но если гелий движется,  $\psi_0$  зависит от координат и времени, причём скорость сверхтекучего движения  $v_s$  связана с фазой  $\alpha$  волновой ф-ции ф-лой

$$v_s = \frac{h}{2\pi m} \nabla \alpha, \quad (2)$$

где  $m$  — масса атома гелия. Фла (2) выражает макроскопич. квантовый характер движения сверхтекучего гелия. Действительно, из (2) следует, что циркуляция скорости  $\oint v_s dl$  по нек-рому замкнутому контуру в жидкости равна  $(h/2\pi m)\delta\alpha$ ;  $\delta\alpha$  — изменение фазы  $\alpha$  при обходе контура, к-рое вследствие однозначности ф-ции  $\Psi_0$  должно равняться  $2\pi l$ , где  $n$  — целое число. Т. о., в сверхтекучем гелии

$$\oint v_s dl = \frac{h}{m} n. \quad (3)$$

Это означает наличие в жидкости квантованных вихревых нитей. При приближении к нити скорость  $v_s$  возрастает как  $h/2\pi m r$ , где  $r$  — расстояние до нити. Вокруг каждой нити имеется циркуляция скорости, равная  $h/m$ .

Такой характер движения сверхтекучего гелия даёт возможность измерения постоянной Планка в прямом макроскопич. механич. эксперименте, поставленном У. Ф. Вайнсом в 1960 [1]. По оси заполненной жидким гелием трубочки радиуса  $R=2$  мм была укреплена струна с собств. частотой 500 Гц. Система помещалась между полюсами магнита, и импульсы тока приводили струну в колебания в нек-рой плоскости. Такое колебание можно рассматривать как совокупность двух циркулярно поляризов. колебаний, к-рые в случае покоящегося гелия имеют одну и ту же частоту  $\nu$ . Затем трубочка приводилась во вращение, и вокруг струны возникло движение гелия с циркуляцией  $h/m$ . При этом на струну действовала сила, аналогичная подъёмной силе крыла и равная на единицу длины струны  $(h/m)rv_s$ , где  $v_s$  — плотность сверхтекучей части гелия, и  $v$  — скорость струны. Эта сила приводила к расщеплению частот циркулирую. поляризов. колебаний. Можно показать, что  $\Delta\nu = (h/2\pi m R^2)\ln(R/a)$ , где  $a$  — масса единицы длины струны. В эксперименте колебания проявлялись в виде биейи сигнала с частотой 0,45 Гц.

Др. способом определения постоянной Планка в этом эксперименте может служить измерение угл. скорости  $\Omega$  вращения трубочки, при которой впервые появляются биейи. Согласно теории,  $\Omega = (h/2\pi m R^2)\ln(R/a)$ ,  $a \approx 4 \cdot 10^{-8}$  см; в условиях эксперимента эта величина составляла 0,2 рад  $\cdot$  с $^{-1}$ .

Отметим, что для эффектов данного типа характерна линейная зависимость наблюдаемой величины от  $h$ .

Ряд М. к. э. наблюдается в сверхпроводящих металлах. Поскольку электроны подчиняются статистике Ферми — Дирака, в одном квантовом состоянии не может находиться больше одного электрона. Однако при переходе в сверхпроводящее состояние в металле образуются пары из двух электронов с противоположными импульсами и спинами — т. е. куперовские пары. Эти пары, являющиеся бозонами, ниже точки перехода находятся в состоянии бозе-конденсации и характеризуются макроскопич. волновой ф-цией  $\Psi_0 = |\Psi_0| \exp(i\alpha)$ . Для описания М. к. э. в сверхпроводниках существенно поведение  $\Psi_0$  при калибровочных (градиентных) преобразованиях векторного  $A$  и скалярного  $\varphi$  потенциалов эл.-магн. поля. Волновая ф-ция пары ведёт себя при этих преобразованиях как волновая ф-ция частицы с зарядом  $2e$  ( $e$  — заряд электрона). Соответственно викакие имеющие прямой ф.з. смысл величины не должны меняться при след. преобразованиях  $A$ ,  $\varphi$  и фазы волновой ф-ции  $\alpha$ :

$$A \rightarrow A + \nabla f, \quad \varphi \rightarrow \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial t}, \quad \alpha \rightarrow \alpha + \frac{4\pi e}{hc} f, \quad (4)$$

где  $f$  — произвольная ф-ция координат и времени.

Характерным М. к. э. в сверхпроводнике является квантование магнитного потока. Поток индукции через отверстие в массивном сверхпроводнике может быть равен лишь целому кратному от нек-рого «кванта потока»  $\Phi_0$ . Для доказательства рассмотрим охватывающий отверстие контур в глубине сверхпроводника (толщи-

ной больше глубины проникновения магн. поля, где магн. поле, а следовательно, и плотность тока отсутствуют (магн. поле вытесняется из сверхпроводника вследствие эффекта Мейснера). Сверхпроводящий ток, как и сверхтекучая скорость в гелии, связан с градиентом фазы волновой ф-ции  $\alpha$ . Поэтому при полном отсутствии магн. поля, когда можно считать, что  $A=0$  во всём пространстве, условие отсутствия тока имеет вид  $\nabla\alpha=0$ . Но при наличии  $A$  это соотношение не может быть верным, т. к. оно нарушается при преобразовании (4). Инвариантное относительно (4) условие, очевидно, имеет вид

$$\nabla\alpha - \frac{4\pi e}{hc} A = 0.$$

Принтегрировав (5) по указанному контуру и учитывая, что  $\oint \nabla\alpha dl = 2\pi$ , а поток магн. индукция

$$\Phi = \int B dS = \int \text{rot} A dS = \oint A dl,$$

получаем

$$\Phi = n\Phi_0, \quad \Phi_0 = \frac{hc}{2|e|} \approx 2,07 \cdot 10^{-7} \text{Гс} \cdot \text{см}^2. \quad (6)$$

Наличие множителя  $n$  в знаменателе непосредственно связано со спариванием электронов в сверхпроводнике. Тот факт, что для вывода (6) было достаточно рассмотреть область пространства, где магн. поле отсутствует, ярко демонстрирует неклассич. характер эффекта.

Квантование потока было экспериментально обнаружено в 1961 В. С. Дивером и У. М. Фарбанком [2], а также Р. Доллом и М. Набузаром [3]. В этих экспериментах использовались оловянные трубочки диам.  $(1-1,5) \cdot 10^{-3}$  см и длиной порядка 1 см. Когда в трубке был «заморожен» один вихрь потока, магн. поле в ней равнялось примерно 0,1 Гс. В опытах можно было измерить магн. момент трубочки, а следовательно, и постоянную Планка.

Др. типа М. к. э. возможны в сверхпроводниках 2-го рода. Достаточно сильные магн. поле проникает в них в виде отл. нитей — вихрей Абрикосова (см. *Квантовые вихри*) с толщиной порядка глубины проникновения слабого поля в сверхпроводник. В каждой нити заключён один квант потока.

Очень важные для техн. приложений М. к. э. основаны на *Джозефсона эффекте* [4,5]. Они наблюдаются в сверхпроводящих цепях, в к-рых имеются джозефсоновские контакты — тонкие слои диэлектрика (или несверхпроводящего материала), разделяющие два сверхпроводника. Квантовые туннелирование позволяет электронам переходить из одного сверхпроводника в другой, так что в цепи может течь сверхпроводящий ток. Величина этого тока  $I$  должна определяться разностью фаз волновой ф-ции сверхпроводящих пар по обе стороны контакта:

$$I(\alpha) = I(\alpha_1 - \alpha_2). \quad (7)$$

Ф-ция  $I(\alpha)$  строго периодична с периодом  $2\pi$ , поскольку при изменении фазы на  $2\pi$  волновая ф-ция  $\Psi_0$  не меняется. Кроме того, она чётная, т. е. изменение знака  $\alpha$  соответствует в квантовой механике *обращению времени*, что меняет знак тока.

Из М. к. э. в джозефсоновских контактах рассмотрим нестационарный эффект Джозефсона, к-рый наблюдается при приложении к контакту постоянной разности потенциалов (этот эффект экспериментально обнаружен И. М. Дмитриком и И. К. Янсом в 1964). В отсутствие разности потенциалов явления в цепи стационарны, так что  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  не зависят от времени:  $\partial\alpha_1/\partial t = \partial\alpha_2/\partial t = 0$ . При наличии скалярного потенциала эти равенства обобщаются так, чтобы они оставались инвариантными при преобразованиях (4):

$$\frac{\partial\alpha_1}{\partial t} + \frac{4\pi e}{h} \varphi_1 = 0, \quad \frac{\partial\alpha_2}{\partial t} + \frac{4\pi e}{h} \varphi_2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_1 - \alpha_2) - \frac{4\pi e}{h} V \approx 0, \quad V = \Phi_1 - \Phi_2.$$

Если  $V$  не зависит от времени, то  $\alpha_1 - \alpha_2 = (4\pi e/h)V(t)$ , что даёт для тока

$$I(x) = I \left( \frac{4\pi e V}{h} t + \text{const} \right). \quad (8)$$

Т. о., если к контакту приложено пост. напряжение, в цепи течёт строго периодич. ток. Более подробная теория показывает, что ток  $I(x)$  в (7) и (8) является си-нусоидальным с частотой  $\nu = 2eV/h$ . Монохроматич-ность тока нарушается только флуктуациями напряже-ния в цепи. Рассмотренный эффект позволил уточнить известное значение постоянной Планка.

На основе джозефсоновских контактов созданы полу-ченные широкие распространение сверхпроводящие квантовые интерферометры — СКВИДы. Принципи-альная схема такого прибора содержит включённое в электрич. цепь, разрезанное в двух местах сверхпро-водящее кольцо, причём в разрезе вставлены джозеф-соновские контакты. Рассуждения, аналогичные про-ведённым при выводе (6), показывают, что если кольцо пронизывает поток магн. индукции  $\Phi$ , то разности фаз на контактах будут отличаться на  $2\pi(n + \Phi/\Phi_0)$ . Это приводит к зависимости тока в цепи от потока  $\Phi$ :

$$I = I_0 \sin \left( \pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \right), \quad (9)$$

что позволяет измерять изменения потока в доли кван-та  $\Phi_0$ .

Своеобразна ситуация в сверхтекучем  $^3\text{He}$ . Атомы  $^3\text{He}$  не являются фермионами, и его сверхтекучесть свя-зана с образованием куперовских пар. В  $^3\text{He}$  эти пары образуются, в отличие от пар электронов в обычных сверхпроводниках, с орбитальными и спиновыми угл. моментами, равными единице. Это приводит к тому, что волновая ф-ция пар в  $^3\text{He}$  является не скалярной, а тензором 2-го ранга, что обуславливает анизотропию сверхтекучего  $^3\text{He}$  и большое разнообразие в нём м. к. э.

В 1980 обнаружен новый тип явлений, к-рый также носит характер м. к. э., — *квантовый Холла эффект*. Он наблюдается при низких темп-рах в инверсном слое — двумерной системе электронов, удерживаемых вблизи границы раздела двух полупроводников перпендикулярным к границе электрич. полем. При нало-жении перпендикулярного слоя магн. поля  $H$  энергетич. спектр электронов разбивается на дискретные уровни Ландау. В вырожденном электронном газе заполнены те уровни Ландау, к-рые лежат ниже энергич. ферми-газа, причём на каждом уровне может нахо-диться (на единице поверхности слоя)  $e^2/h$  электронов. Холловская компонента тензора поверхностной про-водимости  $\sigma_{xy}$  в сильном магн. поле равна  $-Ne^2/h$ , где  $N$  — поверхностная плотность электронов. Если уров-ень Ферми лежит между  $n$ -м и  $(n+1)$ -м уровнями Ландау, то  $N = (e^2/h) \nu$  и

$$\sigma_{xy} = -n \frac{e^2}{h}, \quad (10)$$

т. е.  $\sigma_{xy}$  — квантована. Число электронов, а следова-тельно, и положение уровня Ферми можно менять, изменяя напряжение перпендикулярного электрич. поля  $V$ . При тех значениях  $V$ , при к-рых уровень Ферми лежит указанным выше образом, на кривой  $\sigma_{xy}(V)$  дол-жен иметься плоский участок — «плато» — при кван-тованном значении  $\sigma_{xy}$ . Приведённый вывод не учиты-вает наличия примесей, к-рые могут связывать часть электронов, и электрон-электронного взаимодействия. На опыте, однако, наблюдаются отчётливые «плато», причём  $\sigma_{xy}$  на них равны значениям (10) с очень высо-кой точностью. Кроме того, имеются, по-видимому, «плато» при дробных рациональных значениях  $\nu$ , что можно интерпретировать как существование квазича-стиц с дробными значениями электрич. заряда. Полное

теоретич. объяснение этих особенностей эксперимента пока отсутствуют. Возможно, что куперовское взаимо-действие между электронами приводит к особому рода квантовой когерентности в этой системе.

Лит.: 1) V и n — W. P., The detection of single quanta of circulation in liquid helium II, «Proc. Roy. Soc.», 1961, v. 260 A, p. 218; 2) D и v — B. S. P и v — W. M. Experimental evidence for quantized flux in superconducting cylinders, «Phys. Rev. Lett.», 1961, v. 7, p. 43; 3) Doll R., Näbauer M., Experimental proof of magnetic flux quantization in a supercon-ducting ring, там же, p. 51; 4) Рули и И. О., Рули И. К., Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структу-рах, М., 1970; 5) Барон н. А., Пагерно Д., Эффект Джозефсона: физика и приложения, пер. с англ., М., 1984; 6) Ла-уэн и Л. Э. В. Anomalous quantum Hall effect. An inconsi-derable quantum fluid with fractionally charged excitations, «Phys. Rev. Lett.», 1983, v. 50, p. 1395. См. также лит. при л. П. Литовский.

**МАКСВЕЛЛ (Макс, Мх)** — единица магн. потока в СГС системе единиц. Назв. в честь Дж. К. Максвелла (J. C. Maxwell), 1 Мкс =  $10^{-8}$  Вб (см. Вебер).

**МАКСВЕЛЛА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ** — распределение по скоростям частиц (молекул) макроскопич. физ. систе-мы, находящейся в статич. равновесии, в отсут-ствие внеш. поля при условии, что движение частиц подчиняется законам класси-ч. механики. Установлено Дж. К. Максвеллом (J. C. Maxwell) в 1859. Согласно М. р., вероятное число частиц в единице объёма, компо-ненты скоростей к-рых лежат в интервалах от  $v_x$  до  $v_x + dv_x$ , от  $v_y$  до  $v_y + dv_y$ , и от  $v_z$  до  $v_z + dv_z$ , рав-но  $dw_0 = f(v)dv_x dv_y dv_z$ , где  $f(v) = n(m/2\pi kT)^{3/2} \times \exp[-m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)/2kT]$  — ф-ция распределения Максвелла по скоростям,  $n$  — число частиц в единице объёма,  $m$  — масса частицы,  $T$  — абс. темп-ра. Отсюда следует, что число частиц, абс. значения ско-ростей к-рых лежат в интервале от  $v$  до  $v + dv$ , равно

$$dw_1 = F(v)dv = n(m/2\pi kT)^{3/2} \exp[-mv^2/2kT] 4\pi v^2 dv.$$

Это распределение макс. М. р. по абс. значениям ско-ростей. Ф-ция  $F(v)$  достигает максимума при скорости  $v_0 = (2kT/m)^{1/2}$ , наз. наиб. вероятной скоростью. Для молекул  $H_2$  при  $T = 273K$   $v_0 \approx 1500$  м/с. При помощи М. р. можно вычислить ср. значение любой ф-ции от скорости молекулы: ср. квадрат скорости  $\langle v^2 \rangle = 3kT/m$ , ср. квадратичную скорость  $v_{\text{кв}} \equiv \langle v^2 \rangle^{1/2} = (3kT/m)^{1/2}$ , ср. арифметич. скорость  $\langle v \rangle = (8kT/\pi m)^{1/2}$ , к-рая в  $(4/\pi)^{1/2}$  раза больше  $v_0$  (рис.).

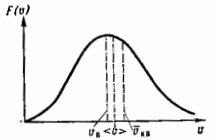
М. р. по относит. скоростям молекулы и имеет вид

$$dw_2 = n(m/4\pi kT)^{3/2} \exp(-mu^2/4kT) 4\pi u^2 du,$$

откуда следует, что ср. относит. скорость молекул равна  $\langle u \rangle = \sqrt{2} \langle v \rangle$ .

М. р. не зависит от взаимодействия между молекулами и справедливо не только для газов, но и для жидкостей, если для них возможно класси-ч. описание. В случае многоатомных молекул М. р. имеет место для посту-пательн. движения моле-кул (для скоростей их центра тяжести) и не зави-сит от внутримолекулярного движения и вращения даже в том случае, когда для них необходимо кванто-вое описание. М. р. справедливо для броуновского дви-жения частиц, взвешенных в жидкости или газе.

Максвелл использовал для обоснования М. р. *деталь-ного равновесия принцип*. М. р. можно получить из канонического распределения Гиббса для класси-ч. систе-мы, интегрируя по всем пространственным координатам и по всем скоростям, кроме одной, т. к. в класси-ч. случае распределение по скоростям не зависит от рас-пределения по пространственным координатам. М. р. является частным решением *кинетического уравнения Больцмана* для случая статич. равновесия в отсут-



ствие внеш. полей. М. р. обрабат в нуль интеграл столкновения этого ур-ния, выражающего баланс между прямыми и обратными столкновениями. Во внеш. потенциальном поле имеет место распределение Максвелла — Больцмана (см. *Больцманов распределение*). М. р. — предельный случай *Возе — Эйштейна распределения* в Ферми — Дирака распределения в случае, когда можно пренебречь явлением квантового вырождения газа. М. р. подтверждено экспериментально О. Штерном (O. Stern) в 1920 в опытах с молекулярными пучками от источника, помещенного внутри вращающейся цилиндрич. поверхности, и позднее (1947) в опытах И. Эстермана (I. Estermann), О. Симпсона (O. Simpson) и Штерна по свободному падению молекул пучка под действием силы тяжести.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Статистическая физика, ч. 1, 3 изд., М., 1976, § 22; Рамазанов Я. П., Молекулярные пучки, пер. с англ., М., 1969; Сивухин Д. В., Общий курс физики, 2 изд., т. 2 — Термодинамика и молекулярная физика, М., 1979, § 72—74; Хирк Р., Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы, пер. с англ., М., 1976, гл. 1.

**МАКСВЕЛЛА СООТНОШЕНИЯ** — соотношения между производными термодинами. ф-ций:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V = -\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S, \quad \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S,$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T, \quad \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T,$$

где  $P$  — давление,  $T$  — абс. темп-ра,  $V$  — объём,  $S$  — энтропия. М. с. можно получить из второго начала термодинамики. Напр., из термодинамич. равенства  $dU = TdS - PdV$ , где  $U$  — внутр. энергия, следует первое М. с. как условие того, что  $dU$  есть полный дифференциал. Остальные М. с. следуют из того, что инвариант  $H$ , энергия Гельмгольца  $F$  и энергия Гиббса  $G$  являются характеристическими функциями или термодинамическими потенциалами в переменных  $S, P, V, T, P, T$ . Иногда М. с. наз. соотношениями в состоянии.

Лит.: Стегли Г., Фазовые переходы и критические явления, пер. с англ., М., 1973, гл. 2; Новиков И. И., Термодинамика, М., 1964, § 2, 8.

**МАКСВЕЛЛА ТЕНЗОР НАТЯЖЕНИЙ** — пространственная часть тензора напряжений-импульса эл.-магн. поля:

$$\sigma_{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi} \left[ E_\alpha E_\beta + H_\alpha H_\beta - \frac{1}{2} \delta_{\alpha\beta} (E^2 + H^2) \right], \quad (1)$$

где  $E_\alpha, E_\beta$  и  $H_\alpha, H_\beta$  — компоненты электр.  $E$  и магн.  $H$  полей в вакууме,  $\delta_{\alpha\beta}$  — символ Кронекера,  $\alpha, \beta = 1, 2, 3$ . М. т. в. введён Дж. К. Максвеллом в 1861. Следуя М. Фарадею (M. Faraday), Максвелл считал причиной электр. и магн. явлений упругие деформации гипотетич. среды — *эфира*. Характерной особенностью сил упругости является возможность сведения их к натяжениям (напряжениям), возникающим в деформиров. средах. Если  $f_\alpha$  — компонент силы, действующий на единицу объёма упругой среды, то суммарный  $\alpha$ -компонент силы, действующий на нек-рый объём  $V$ , сводится к интегралу сил натяжений по поверхности этого объёма:

$$\int f_\alpha dV = \oint \sigma_{\alpha\beta} dS_\beta, \quad (2)$$

где  $dS_\beta$  — компоненты элемента поверхности  $dS$ , направленного по внеш. нормали к поверхности. Т. о.,  $\sigma_{\alpha\beta}$  представляет собой  $\alpha$ -й компонент силы, действующей на единицу поверхности, перпендикулярный  $\beta$ -й оси. Если известны поля  $E$  и  $H$  вне нек-рого тела, находящегося в вакууме, то М. т. н. позволяет найти силу, действующую на тело. Так, напр., учитывая, что у поверхности проводника напряжённость поля  $E$  имеет только нормальную составляющую, из (1) легко найти, что на единицу поверхности проводника действует сила «отрицательного» давления (давление

направлено наружу от проводника)  $E^2/8\pi$ . Аналогично на единицу поверхности сверхпроводника, помещённого в магн. поле, действует сила «положительного» давления, равная  $H^2/8\pi$ . Различие в знаке силы связано с тем, что у поверхности сверхпроводника, выталкивающего магн. поле, напряжённость поля  $H$  имеет только тангенциальную составляющую. М. т. н. позволяет определять величину *давления света*. Напр., пусть плоская монохроматич. световая волна падает по нормали на поверхность диэлектрика и поглощается им. Т. к. вблизи поверхности диэлектрика поля  $E$  и  $H$  имеют только тангенциальные составляющие, то, согласно (1), давление световой волны на диэлектрик равно плотности энергии эл.-магнитного поля  $(E^2 + H^2)/8\pi$ .

Выражение (2) справедливо только в том случае, если компоненты тензора натяжений связаны с плотностью объёмных сил дифференц. соотношением

$$\frac{\partial \sigma_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} = f_\alpha. \quad (3)$$

Используя *Максвелла уравнения*, из (3) получаем след. выражение для объёмной силы:

$$f = \rho E + \frac{1}{c} [jH] + \frac{1}{4\pi c} \frac{\partial}{\partial t} [EH], \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность электр. заряда,  $j$  — плотность электр. тока. Соотношение (4) связывает плотность объёмной силы со скоростью изменения механич. импульса (*Доренца силой*) и со скоростью изменения импульса эл.-магн. поля.

В случае материальной среды Максвелл предполагал, что тензор натяжений имеет вид

$$\sigma_{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi} \left[ E_\alpha D_\beta + H_\alpha B_\beta - \frac{1}{2} \delta_{\alpha\beta} (ED + HB) \right], \quad (5)$$

где  $D_\alpha, B_\beta$  — компоненты электр. и магн. индукции. Тензор (5) в общем случае несимметричен. Система объёмных сил может быть заменена эквивалентной системой натяжений только тогда, когда тензор натяжений симметричен (в противном случае момент объёмных сил будет отличаться от момента сил натяжений).

В макроскопич. электродинамике существуют разл. конкурирующие выражения для тензора энергии-импульса эл.-магн. поля в среде. Основные из них: симметричный тензор Абрагама и несимметричный тензор Мияковского, пространственной частью к-рого является выражение (5). Тензор натяжений, получающийся из (5) симметризацией по индексам  $\alpha$  и  $\beta$ , был введён Г. Р. Герцем (H. R. Hertz) и представлял собой симметричную часть тензора энергии-импульса Абрагама в системе покоя материальной среды как целого. Существование различных допустимых выражений для тензора энергии-импульса и соответственно для тензора натяжений эл.-магн. поля в среде (в т. ч. и несимметричных) вызвано двумя обстоятельствами. Первое связано с тем, что два тензора натяжений  $\sigma_{\alpha\beta}$  и  $\sigma'_{\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta} + \tau_{\alpha\beta}$  определяют одну и ту же наблюдаемую объёмную силу  $f_\alpha$ , если  $\partial \tau_{\alpha\beta} / \partial x_\beta = 0$ , а т. к. система натяжений рассматривается как нек-рое вспомогат. построение, то тензоры  $\sigma_{\alpha\beta}$  и  $\sigma'_{\alpha\beta}$  эквивалентны. Второе обстоятельство заключается в том, что тензор натяжений эл.-магн. поля в среде представлял собой только часть полного тензора натяжений  $\sigma_{\alpha\beta}^{\text{полн}} = \sigma_{\alpha\beta}^{\text{полн}} + \sigma_{\alpha\beta}^{\text{вещества}}$ . Разделение полного тензора натяжений на «полевую» и «вещественную» части может осуществляться разл. способами, каждый из к-рых обладает своими преимуществами.

В случае изотропной среды с диэлектрич. проницаемостью  $\epsilon$  и магн. проницаемостью  $\mu$  М. т. н. (5) симметричен и имеет вид

$$\sigma_{ab} = \frac{1}{4\pi} [eE_a E_b + \mu H_a H_b - \frac{1}{2} (eE^2 + \mu H^2)]. \quad (6)$$

Если поля  $E$  и  $H$  стационарны, то из соотношений (6) и (3) следует выражение для плотности объемной силы:

$$f = f_0 = \rho E + \frac{1}{c} [jH] - \frac{1}{8\pi} E^2 \text{grad } e - \frac{1}{8\pi} H^2 \text{grad } \mu. \quad (7)$$

В М. т. н. (6) и соответственно в выражениях для плотности объемной силы (7) не учтена зависимость  $e$  и  $\mu$  от плотности среды, ответственная за возникновение магнито- и электрострикционных явлений — уругих деформаций, вызываемых в материальных средах эл.-магн. полями.

Если поля  $E$  и  $H$  нестационарны, то из (6) и (3) следует, вместо (7), соотношение

$$f = f_0 + \frac{e\mu}{4\pi c} \frac{\partial}{\partial t} [EH]. \quad (8)$$

Какалось бы, в рассматриваемом случае изотропной среды не возникает никаких затруднений. М. т. н. симметричен, нет разгласий в том, как он выглядит, и как будто бы однозначно интерпретируется соотношение (8), аналогичное соотношению (4) для случая вакуума: второе слагаемое в (8) естественно считать скоростью изменения плотности импульса эл.-магн. поля в среде, равной, следовательно,

$$g^M = e\mu [EH]/4\pi c$$

(такой считал плотность импульса в среде Г. Минковского, Н. Minkowski, 1908). Однако, согласно М. Абрагама (М. Abraham, 1909), плотность импульса эл.-магн. поля в среде  $g^A = [EH]/4\pi c$ . Приняв для плотности импульса в среде выражение Абрагама, можно переписать соотношение (8) в виде

$$f = f_0 + f^A + \frac{1}{4\pi c} \frac{\partial}{\partial t} [EH]. \quad (9)$$

Теперь последнее слагаемое в (9) описывает скорость изменения плотности импульса эл.-магн. поля в среде, а величина

$$f^A = \frac{e\mu}{4\pi c} \frac{\partial}{\partial t} [EH] \quad (10)$$

представляет собой т. н. силу Абрагама. В 1975—77 предприняты попытки непосредств. измерения этой крайне малой силы. Объемная сила, соответствующая силе Абрагама (10), была обнаружена в эксперименте канад. физиков (Walker G. B., Lahoz D., Walker G., «Can. J. Phys.», 1975, в. 53, р. 2577). Ее существование свидетельствует в пользу выбора симметричного тензора энергии-импульса эл.-магн. поля в среде (и соответствующего симметричного М. т. н. в форме Абрагама.

Лит.: Тамм И. Е., Основы теории электричества, 10 изд., М., 1989; Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Гинзбург В. Л., Теоретическая физика и астрофизика, 3 изд., М., 1987.

Ю. П. Степановский.

## МАКСВЕЛЛА УРАВНЕНИЯ

### Содержание:

1. Краткая история . . . . .	33
2. Каноническая форма в интегральной форме . . . . .	33
3. Максвелла уравнения в дифференциальной форме . . . . .	33
4. Общая характеристика Максвелла уравнений . . . . .	34
5. Максвелла уравнения для комплексных амплитуд . . . . .	34
6. Алгебраические Максвелла уравнения . . . . .	34
7. Материальные уравнения Максвелла . . . . .	35
8. Граничные условия . . . . .	35
9. Двойственная симметрия Максвелла уравнений . . . . .	36
10. Максвелла уравнения в четырехмерном представлении . . . . .	37
11. Лоренц-инвариантность Максвелла уравнений . . . . .	37
12. Латлантность для электромагнитного поля . . . . .	38
13. Единственность решений Максвелла уравнений . . . . .	38
14. Классификация приближений Максвелла уравнений . . . . .	38
15. Максвелла уравнения в различных системах единиц . . . . .	39

Максвелла уравнения — ур-ния, к-рым подчиняется (в пределах применимости классической макроскопич. электродинамики, см. *Электродинамика классическая*), электромагнитное поле в вакууме и сплошных средах.

### 1. Краткая история

Установлению М. у. предшествовал ряд открытий законов взаимодействий заряженных, намагниченных и токовесущих тел (в частности, законов Кулола, Био — Савара, Ампера). В 1831 М. Фарадей (М. Faraday) открыл закон эл.-магн. индукции и примерно в то же время ввел понятие электрич. и магн. полей как самостоят. физ. субстанций. Опираясь на фарадеевское представление о поле в введя ток смещения, равнозначный по своему магн. действию обычному электрич. току, Дж. К. Максвелл (J. C. Maxwell, 1864) сформулировал систему ур-ний, названную впоследствии ур-ниями Максвелла. М. у. функционально связывают электрич. я магн. поля с зарядами и токами и охватывают собой все известные закономерности макроэлектродинамики. Впервые о М. у. было доложено на заседании Лондонского Королевского общества 27 окт. 1864. Первоначально Максвелл прибегал к всямогат. механич. моделям «эфира», но уже в «Трактате об электрич. и магнетизме» (1873) эл.-магн. поле рассматривалось как самостоят. физ. объект. Физ. основа М. у. — принцип близкодествия, утверждающий, что передача эл.-магн. возмущений от точки к точке происходит с конечной скоростью (в вакууме со скоростью света  $c$ ). Он противопоставляется ньютоновскому принципу дальнедействия, сводящемуся к мгновенной передаче воздействий на любое расстояние ( $c \rightarrow \infty$ ). Матем. аппаратом теории Максвелла послужил векторный анализ, представленный в инвариантной форме через *кватернионы* Гамильтона. Сам Максвелл считал, что его заслуга состоит лишь в матем. оформлении идей Фарадея.

### 2. Каноническая форма

Канонич. форма записи, принятая ныне, принадлежит Г. Герцу (Н. Hertz) и О. Хевисайду (O. Heaviside) и основана на использовании не кватернионных, а векторных полей: напряженности электрического поля  $E$ , напряженности магнитного поля  $H$ , векторов электрической индукции  $D$  и магнитной индукции  $B$ . М. у. связывают их между собой, с плотностью электрического заряда  $\rho$  и плотностью электрического тока  $j$ , к-рые рассматриваются как источники:

$$[\nabla H] = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (1)$$

$$[\nabla E] = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla B = 0, \quad (3)$$

$$\nabla D = 4\pi \rho. \quad (4)$$

Здесь использована Гаусса система единиц (о записи М. у. в др. системах см. в разделе 15). Входящие в (1) — (4) величины  $E, D, j$  являются истинными, или полярными, векторами (а величина  $\rho$  — истинным скаляром), поля  $H$  и  $B$  — псевдовекторами, или аксиальными векторами. Все эти величины предполагаются непрерывными (вместе со всеми производными) функциями времени  $t$  и координат  $r$  ( $r_\alpha = x_\alpha, \alpha = 1, 2, 3$ ). Следовательно, в ур-ниях (1) — (4) не учитывается ни дискретная структура электрич. зарядов и токов, ни квантовый характер самих полей. Учет дискретности истинных источников может быть произведен даже в доквантовом (классич.) приближении с помощью Лоренца — Максвелла уравнений.

### 3. Максвелла уравнения в интегральной форме

Используя Гаусса — Остроградского формулу и Стокса формулу, ур-ниями (1) — (4) можно придать форму интегральных:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \int \mathbf{j} dS + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{D} dS, \quad (1a)$$

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{B} dS, \quad (2a)$$

$$\oint \mathbf{B} dS = 0, \quad (3a)$$

$$\oint \mathbf{D} dS = 4\pi \int \rho dV. \quad (4a)$$

Криволинейные интегралы в (1a), (2a) берутся по произвольному замкнутому контуру (их наз. циркуляциями векторных полей), а стоящие в правых частях поверхностные интегралы — по поверхностям, ограниченным этими контурами (опирающимися на них), причём направление циркуляции (направление элемента контура  $d\mathbf{l}$ ) связано с направлением нормали к  $S$  (вектор  $dS$ ) правосторонним соотношением (если в качестве исходного выбрано пространство с правыми системами координат). В интегралах по замкнутым поверхностям ( $S$ ) в (3a), (4a) направление вектора элемента площади  $dS$  совпадает с наружной нормалью к поверхности;  $V$  — объём, ограниченный замкнутой поверхностью  $S$ .

М. у. в форме (1a) — (4a) предназначаются не только для изучения топологии, свойств эл.-магн. полей, но и являются удобным аппаратом решения конкретных задач электродинамики в системах с достаточно высокой симметрией или с априори известными распределениями полей. Кроме того, в матем. отношении эта система ур-ний содержательнее системы (1) — (4), поскольку пригодна для описания разрывных, недифференцируемых распределений полей. Но в отношении физ. пределов применимости обе системы ур-ний равнозначны, т. к. любые скачки полей в макрорелевационных пределах рассматриваются как пределы микромасштабно плавных переходов, с тем чтобы внутри них сохранялась возможность усреднения ур-ний Лоренца — Максвелла. С этими оговорками резкие скачки можно описывать и в рамках М. у. (1) — (4), прибегая к аппарату обобщённых функций.

Наконец, М. у. в интегральной форме облегчают физ. интерпретацию мн. эл.-магн. явлений и поэтому наиболее сопоставляются с теми экспериментально установленными законами, к-рым они обязаны своим происхождением. Так, ур-ние (1a) есть обобщение Био — Савара закона (с добавлением к току  $I = \int_S \mathbf{j} dS$  максвелловского смещения тока). Ур-ние (2a) выражает закон индукции Фарадея; иногда его правую часть переобозначают через «магн. ток смещения»

$$I_{\text{см}}^m = \int_S^m \mathbf{j}_{\text{см}} dS = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \Phi_B}{\partial t}, \quad I_{\text{см}}^m = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial B}{\partial t},$$

где  $j_{\text{см}}^m$  — плотность «магн. тока смещения»,  $\Phi_B$  — магн. поток. Ур-ние (3a) связывают с именем Гаусса (С. F. Gauß), установившим соленоидальность поля  $\mathbf{B}$ , обусловленную отсутствием истинных магн. зарядов. Впрочем вопрос о существовании магнитных монополей пока остаётся открытым. Но соответствующее обобщение М. у. произведено (Хевисайд, 1885) на основе принципа двойственной симметрии М. у. (см. в разделе 9), для чего в (2) и (2a) наряду с магн. током смещения вводится ещё и «истинный» магн. ток (процедура, обратная проделанной когда-то Максвеллом с элетрич. током в первом ур-нии), а в ур-ние Гаусса (3), (3a) — магн. заряд

$$Q^m = \frac{1}{4\pi} \int \rho^m dV = \frac{1}{4\pi} \oint \mathbf{B} dS,$$

где  $\rho^m$  — плотность магн. заряда. Фактически все экспериментальные установки для регистрации ожидаемых магнитных монополей основаны на этом пред-

положении. Наконец, ур-ние (4a) определяет поле свободного элетрич. заряда; его иногда называют законом Кулона (Ch. A. Coulomb), хотя, строго говоря, оно не содержит утверждения о силе взаимодействия между зарядами, да и к тому же справедливо не только в электростатике, но и для систем с произвольными изменениями поля во времени. На тех же основаниях иногда и ур-ние (1a) связывают с именем Ампера (A. Ampère).

#### 4. Общая характеристика Максвелла уравнений

Совокупность М. у. (1) — (4) составляет систему из восьми (двух векторных и двух скалярных) линейных дифференц. ур-ний 1-го порядка для четырёх векторов ( $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{D}$ ). Источники (скаляр  $\rho$  и вектор  $\mathbf{j}$ ) не могут быть заданы произвольно; применяя операцию (7) к ур-нию (1) и подставляя результат в (4), получаем:

$$\nabla \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

или в интегральной форме:

$$\oint \mathbf{j} dS + \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = 0. \quad (5a)$$

Это ур-ие непрерывности для тока, содержащее в себе закон сохранения заряда для замкнутых изолиров. областей ( $\oint \mathbf{j} dS = 0$ ,  $\int \rho dV = \text{const}$ ), — один из фундам. физ. принципов, подтверждаемых в любых экспериментах.

Ур-ния (1) — (4) распадаются на два самостоят. «блока»: ур-ния (1) и (4), соединяющие векторы  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$  и источники  $\rho$ ,  $\mathbf{j}$ , и ур-ния (2) и (3) — однородные ур-ния для  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ , не содержащие источников. Ур-ния (2) и (3) допускают получение общего решения, в к-ром  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  выражаются через т. н. потенциалы электромагнитного поля  $A$  и  $\Phi$ . При этом ур-ние (3) «почти следует из (2)», т. к. операция (7), применённая к (2), даёт  $\nabla \mathbf{B} = \text{const}$ , что отличается от (3) только константой, определяемой нач. условиями. Аналогично ур-ние (4) «почти следует из (1) и ур-ния непрерывности (5).

Система М. у. (1) — (4) не является полной: по существу, она связывает 4 векторные величины двумя векторными ур-ниями. Её замыкание осуществляется путём добавления соотношений, связывающих векторы 1-го «блока»  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{H}$  с векторами 2-го «блока»  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ . Эти соотношения зависят от свойств среды (материальных сред), в к-рых происходит эл.-магн. процесс, и наз. материальными ур-ниями (см. раздел 7).

#### 5. Максвелла уравнения для комплексных амплитуд

В силу линейности системы (1) — (4) для её решений справедлив суперпозиции принцип. Часто оказывается удобным фурье-представление общего решения (1) — (4) как ф-ции времени (см. Фурье преобразование). Записывая временной фактор в виде  $\exp(i\omega t)$ , для комплексных фурье-амплитуд ( $\mathbf{E}_\omega$ ,  $\mathbf{H}_\omega$  и т. д.) получаем систему ур-ний

$$[\nabla \mathbf{H}_\omega] - \frac{i\omega}{c} \mathbf{D}_\omega = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_\omega, \quad (16)$$

$$[\nabla \mathbf{E}_\omega] + \frac{i\omega}{c} \mathbf{B}_\omega = 0, \quad (26)$$

$$\nabla \mathbf{B}_\omega = 0, \quad (36)$$

$$\nabla \mathbf{D}_\omega = 4\pi \rho_\omega. \quad (46)$$

Система (16) — (46) в нек-ром смысле удобнее (1) — (4), ибо упрощает применение к эл.-динамик. системам, обладающим временной дисперсией (см. раздел 7), т. е. зависимостью параметров от частоты  $\omega$ .

#### 6. Алгебраические Максвелла уравнения

Если распространить (в силу линейности М. у.) фурье-разложение и на зависимость полей от пространственных координат, т. е. представить общее решение ур-ний (1) — (4) в виде суперпозиции плоских волн ти-

на  $\text{exp } i(\omega t - \mathbf{k}r)$  ( $\mathbf{k}$  — волновой вектор), то для фурье-компонентов поля ( $E_{\omega, \mathbf{k}}$  и т. д.) получим систему алгебраич. ур-ний:

$$[ikH_{\omega, \mathbf{k}}] - \frac{i\omega}{c} D_{\omega, \mathbf{k}} = \frac{4\pi}{c} j_{\omega, \mathbf{k}}, \quad (1a)$$

$$[ikE_{\omega, \mathbf{k}}] + \frac{i\omega}{c} B_{\omega, \mathbf{k}} = 0, \quad (2a)$$

$$(ikB_{\omega, \mathbf{k}}) = 0, \quad (3a)$$

$$(ikD_{\omega, \mathbf{k}}) = 4\pi\rho_{\omega, \mathbf{k}}. \quad (4a)$$

Такое сведение М. у. к набору ур-ний для осцилляторов (осцилляторов поля) составляет важный этап перехода к квантовой электродинамике, где эл.-магн. поле рассматривается как совокупность фотонов, характеризующихся энергиями  $\hbar\omega$  и импульсами  $\hbar\mathbf{k}$ ,  $|\mathbf{k}| = \omega/c$ . Однако и в макроелектродинамике представления (1a) — (4a) оказываются иногда вполне адекватными физ. сущности процессов: напр., при выделении откликов высокочастотных систем (см. *Объемный резонатор*) или при изучении механизма формирования мод со сложной пространственной структурой из набора плоских волн и т. п. Наконец, М. у. в форме (1a) — (4a) удобны для описания свойств эл.-динамич. систем, обладающих не только временной, но и пространственной дисперсией, если последняя задается в виде зависимости параметров от волнового вектора  $\mathbf{k}$ .

### 7. Материальные уравнения

В макроелектродинамике материальные связи, характеризующие эл.-магн. свойства сред, вводятся феноменологически; они находятся либо непосредственно из эксперимента, либо на основании модельных представлений. Существуют два способа описания: в одном векторы  $E$  и  $H$  считаются исходными и материальные ур-ния задаются в виде  $D = D(E, H)$  и  $B = B(E, H)$ , в другом — за исходные берутся векторы 2-го «блока»  $E$  и  $B$ , и соответствующие материальные связи представляются иначе:  $D = D(E, B)$ ,  $H = H(E, B)$ . Оба описания совпадают для вакуума, где материальные уравнения вырождаются в равенства  $D = E$  и  $B = H$ .

Рассмотрим простейшую модель среды, характеризующую мгновенные, локальные поляризац. отклик на появляющиеся в ней поля  $E$  и  $H$ . Под действием поля  $E$  в такой среде возникает электрич. поляризация  $P^e(E)$  (см. *Поляризации вектор*), а под действием поля  $H$  — магн. поляризация  $P^m(H)$ . Чаще её наз. *магнетичностью* и обозначают  $M$ .

Материальные ур-ния для таких сред имеют вид

$$D = E + 4\pi P^e(E), \quad (6)$$

$$B = H + 4\pi M(H). \quad (7)$$

При этом индустрированы в среде электрич. заряды  $\rho_{\text{св}}$ , связываемые или поляризац. зарядами с плотностью  $\rho_{\text{св}}^e$ , а токи, обусловленные их изменениями, — поляризац. токами с плотностью  $j_{\text{св}}^e$ :

$$\begin{aligned} \rho_{\text{св}}^e &= -\nabla P^e(E), \\ j_{\text{св}}^e &= \frac{\partial}{\partial t} P^e(E), \\ \nabla j_{\text{св}}^e + \frac{\partial}{\partial t} \rho_{\text{св}}^e &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Эти понятия были перенесены и на магн. поля, что можно выразить в виде системы ур-ний, аналогичной (8):

$$\begin{aligned} \rho_{\text{св}}^m &= -\nabla M(H), \\ j_{\text{св}}^m &= \frac{\partial M(H)}{\partial t}, \\ \nabla j_{\text{св}}^m + \frac{\partial}{\partial t} \rho_{\text{св}}^m &= 0, \end{aligned}$$

и только потом выяснилось, что истинными источниками намагничивания среды оказались электрич. токи  $j_{\text{св}}^e = c[\nabla M(B)]$ , а не магн. заряды. Поэтому терминология сложилась на основе физической «векторной» системы

$$[\nabla H] = \frac{4\pi}{c} j^e + \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t},$$

$$\nabla H = 4\pi\rho_{\text{св}}^m(H),$$

тогда как следовало бы принять безазерные ур-ния

$$[\nabla B] = \frac{4\pi}{c} j^e + \frac{4\pi}{c} j_{\text{св}}^e + \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (9)$$

$$\nabla B = 0,$$

что равносильно замыканию исходных М. у. (1) — (4) с помощью материальных связей

$$H = B - 4\pi M(B). \quad (7a)$$

Из (6) и (7a) следует, что 2-й вариант представления материальных соотношений, в к-ром постулируются в качестве исходных векторы  $E$  и  $B$ , физически предпочтительнее.

В модели Лоренца — Максвелла усреднение микрополя  $H_{\text{микро}}$ , произведенное с учётом выклада со стороны индуциров. полей, приводит к ур-ниям (9) и соответственно  $\langle H_{\text{микро}} \rangle = B$ . Однако обычно параметры сред вводятся с помощью ур-ний (7), что облегчает двоякую симметризацию ф-л (подробнее см. в разделе 9). Напр., скалярные восприимчивости сред ( $\chi^e$ ,  $\chi^m$ ) определяются соотношениями

$$P^e = \chi^e E, \quad P^m = \chi^m H$$

и позволяют ввести *дизметрическую проницаемость*  $\epsilon$  и *магнитную проницаемость*  $\mu$ :

$$D = \epsilon E, \quad B = \mu H, \quad \epsilon = 1 + 4\pi\chi^e, \quad \mu = 1 + 4\pi\chi^m. \quad (10)$$

Простейшие модели сред характеризуются пост. значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ . В случае вакуума  $\epsilon = \mu = 1$ ,  $\chi^e = \chi^m = 0$ . Классификация разл. сред обычно основывается на материальных ур-ниях типа (10) и их обобщениях. Если проницаемости  $\epsilon$  и  $\mu$  не зависят от полей, то М. у. (1) — (4) вместе с материальными ур-ниями (10) остаются линейными, поэтому о таких средах говорят как о *линейных средах*. При наличии зависимостей  $\epsilon = \epsilon(E, B)$ ,  $\mu = \mu(E, B)$  среды наз. *нелинейными*; решения М. у. в *нелинейных средах* не удовлетворяют принципу суперпозиции. Если проницаемости зависят от координат  $\epsilon = \epsilon(r)$ ,  $\mu = \mu(r)$ , то говорят о *неоднородных средах*, при зависимости от времени  $\epsilon = \epsilon(t)$ ,  $\mu = \mu(t)$  — о *нестационарных средах* (иногда также эл.-динамич. системы наз. *параметрически ми*). Для *анизотропных сред* скаляры  $\epsilon$ ,  $\mu$  в (10) заменяются на *тензоры*:  $D_\alpha = \epsilon_{\alpha\beta} E_\beta$ ,  $B_\alpha = \mu_{\alpha\beta} H_\beta$ ,  $\alpha, \beta = 1, 2, 3$  (по дважды встречающимся индексам производится суммирование). Важное значение имеют также эффекты запаздывания и нелокальности отклика среды на внеш. поля. Значение индуциров. поляризации  $P^e$ , напр. в момент  $t$ , может определяться, вообще говоря, значениями полей во все предыдущие моменты времени, т. е.

$$P^e = \int_{-\infty}^t \chi^e(t-t') E(t') dt',$$

что при преобразовании Фурье по времени приводит к зависимости  $\epsilon(\omega)$  [соответственно  $\mu(\omega)$ ]. Такие среды наз. *средами с временной (частотной) дисперсией* или *просто диспергирующими средами*. Аналогичная связь устанавливается и для нелокальных взаимодействий, когда отклик в точке  $r$  зависит от значения полей,



строго говоря, во всех окружающих точках  $r'$ , но обычно всё-таки в пределах нек-рой конечной её окрестности:  $D(r) = \int [e(r-r')E(r')dV'$ . При преобразовании Фурье по  $r$  это приводит к появлению зависимостей  $\epsilon(k)$  и  $\mu(k)$ ; такие средн. значения с пространственной дисперсией (см. *Дисперсия пространственных*).

В проводящих средах входящая в М. у. (1) — (5) плотность тока  $j(r,t)$  состоит из двух слагаемых: одно по-прежнему является сторонним током  $j_{ст}$ , обусловленным заданным перемещением электрич. зарядов под действием сторонних сил (обычно электр. поля, происходящего от полей, определяемых системой М. у., и связанным с ними материальными у-ниями вида  $j_{пр} = j_{пр}(E, B)$ ). В простейшем случае эта зависимость сводится к локальному *Ома закону*:

$$j^e = j_{ст}^e + j_{пр}^e = j_{ст}^e + \sigma E, \quad (11)$$

где  $\sigma$  — *электропроводность* (проводимость) среды. Иногда в (11) вводит обозначение  $j_{ст}^e = \sigma E_{ст}$ , благодаря к-рому различают системы с заданными токами и системы с заданными полями (напряжениями). Для несвязанных во времени полей, подчинённых у-ниям (16) — (46) и материальным связям (10) и (11), вводится комплексная диэлектрич. проницаемость, объединяющая (10) и (11),  $\tilde{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$ , мнимая часть к-рой обусловлена проводимостью и определяет *диссипацию энергии эл.-магн. поля* в среде. По аналогии вводится комплексная магн. проницаемость  $\tilde{\mu} = \mu' - i\mu''$ , мнимая часть к-рой обуславливает потери, связанные с перемещением среды. Комплексные проницаемости в общем случае зависят от частоты  $\omega$  и волнового вектора  $k$ ; эти зависимости не могут быть произвольными: *причинности принцип* связывает их действительные и мнимые части *Крамерса — Кроника соотношениями*.

В общем случае вид материальных у-ний зависит также и от системы отсчёта, а в к-рой эти у-ния рассматривают. Так, если в неподвижной системе  $K$  среда характеризуется простейшими у-ниями (10), то в инерциальной системе  $K'$ , движущейся относительно  $K$  с пост. скоростью  $u$ , появляется анизотропия:

$$\begin{aligned} D'_\parallel &= \epsilon E', & H'_\parallel &= \frac{1}{\mu} B'_\parallel, \\ D'_\perp &= \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-1} \left\{ \epsilon \left( E'_\perp - \frac{1}{c} [u B'] \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\mu} \left[ \frac{u}{c} (B' + \left[ \frac{u}{c} E' \right]) \right] \right\}, & (12) \\ H'_\perp &= \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-1} \left\{ \frac{1}{\mu} \left( B'_\perp + \left[ \frac{u}{c} D' \right] \right) - \right. \\ &\quad \left. - \epsilon \left[ \frac{u}{c} (D' - \left[ \frac{u}{c} H' \right]) \right] \right\}, \end{aligned}$$

где индексы  $\parallel$  и  $\perp$  обозначают продольные и поперечные  $k$  и составляющие векторов. В рамках алгебры М. у. (16) — (46) материальные у-ния (12) могут быть переписаны в виде

$$D'_\alpha = \epsilon_{\alpha\beta}(\omega, k) E'_\beta, \quad B'_\alpha = \mu_{\alpha\beta}(\omega, k) H'_\beta,$$

что можно трактовать как наличие временной и пространственной дисперсии. Исследование процессов с материальными связями типа (12) составляет предмет *электродинамики движущихся сред*. Заметим, что хотя характеристики  $\epsilon$  и  $\mu$  удобно симметризуя материальные у-ния, их введение не является непременно условием замыкания М. у. Соответствующей перенормировкой допустимо свести описание магн. поля к одностороннему, т. е. сделать  $B = H$ ,  $\mu = 1$ , но при этом

даже для изотропной среды диэлектрич. проницаемость становится тензором, она различна для вихревых и потенциальных полей. Физически это связано с неоднородностью модельного представления дипольных моментов, во всяком случае при  $\omega \neq 0$  они могут равноправно интерпретироваться и как зарядовые, и как токовые.

### 8. Граничные условия

Поскольку М. у. справедливы для любых (в рамках применимости макрорелевационности) неоднородных сред, то в областях резкого изменения их параметров иногда можно игнорировать тонкую структуру распределения полей в переходном слое и ограничиться «сглаженным» полем по равные стороны от него, заменив тем самым переходный слой мате. поверхностью — границей, линейной толщиной. Если внутри переходной области имелись заряды с объёмной плотностью  $\rho$  или токи с объёмной плотностью  $j$ , то при сжатии слоя  $\Delta z$  поверхность сохраняются их интегральные значения — вводятся поверхностные заряды  $\rho_{пов}$  и поверхностные токи  $j_{пов} = \int \rho dx, j_{пов} = \int j dx$ , где  $\Delta z$  — толщина переходного слоя.

Применение М. у. и у-ния непрерывности приводит к следующим граничным условиям:

$$[n_{1,2}(H_2 - H_1)] = \frac{4\pi}{c} j_{пов}, \quad (1e)$$

$$[n_{1,2}(E_2 - E_1)] = 0, \quad (2e)$$

$$n_{1,2}(B_2 - B_1) = 0, \quad (3e)$$

$$n_{1,2}(D_2 - D_1) = 4\pi \rho_{пов}, \quad (4e)$$

$$n_{1,2}(j_2 - j_1) = -\frac{c}{4\pi} \rho_{пов}. \quad (5e)$$

Здесь индексы 1 и 2 характеризуют поля по разные стороны от границы, а  $n_{1,2}$  — единичный вектор нормали к поверхности, направленный из среды 1 в среду 2. Правила (1e) — (5e) пригодны для перехода через любые поверхности, независимо от того, совпадают ли они с границами раздела сред или проходят по однородным областям, поэтому их иногда наз. *поверхностными* М. у.

Иногда граничные условия (1e) — (5e) порождают краевые условия, т. е. задают не правые переходы через границу, а сами поля на ней. Напр., внутри идеального проводника ( $\sigma = \infty$ ) в силу (1e)  $E = 0$  (иначе возник бы ток неограниченной плотности), поэтому на границе раздела диэлектрик — идеальный проводник в согласии с (2e)  $[n_{1,2}E_1] = 0$ . Такие границы наз. *идеальными* электрич. стенками. Аналогично вводится понятие *идеальной* магн. стенки, на к-рой  $[n_{1,2}H_1] = 0$ . Если структура полей по одну сторону от границы универсальна, т. е. не зависит от распределения полей по др. сторону, то краевые условия могут состоять в задании не самих полей, а лишь связей между ними, напр.  $E_{tan} = (c/4\pi)Z(n_{1,2}H)$ , где  $Z$  — нек-рая скалярная или тензорная ф-ция координат границы ( $E_{tan}$  — тангенциальный компонент  $E$ ). К условиям такого рода относится, в частности, *Левитовича граничное условие* для синусоидально меняющихся во времени полей на поверхности хороших проводников.

### 9. Двойственная симметрия Максвелла уравнений

Двойственная симметрия М. у. имеет место для любой формы их записи. Она состоит в инвариантности М. у. относительно линейных преобразований полей, производимых по след. правилам:

$$E' = E \cos \theta + H \sin \theta, \quad H' = H \cos \theta - E \sin \theta,$$

$$D' = D \cos \theta + B \sin \theta, \quad B' = B \cos \theta - D \sin \theta,$$

Здесь  $\theta$  — произвольный угл. параметр; в частности, при  $\theta = 0$  получаются тождественные преобразования, а при  $\theta = \pi/2$  — стандартные преобразования перестановочной двойственности (операция  $e \pm m$ ): замена  $E \rightarrow H, H \rightarrow -E, D \rightarrow B, B \rightarrow -D$  даёт в областях, свободных от источников, новое решение М. у. При этом, однако, оно меняет местами ур-ния (1)  $\pm \pm (2), (3) \pm (4)$  и, следовательно, там, где раньше были распределены электрич. источники, возникают источн. магнитные ( $\rho^e \rightarrow \rho^m, j^e \rightarrow j^m, \rho^m \rightarrow -\rho^e, j^m \rightarrow -j^e$ ). Поэтому с точки зрения двойственной симметрии М. у. задание материальных связей в виде  $D = D(E, H)$  и  $B = B(E, H)$  представляется вполне удобным. Дуально-симметричные М. у. обладают рядом достоинств, по крайней мере в чисто методич. плане. Так, напр., они симметрируют скачки тангенциальных компонентов магн. и электрич. полей и, если задание  $H_{\text{тан}}$  на поверхности идеальной электрич. стенки эквивалентно заданию поверхностного электрич. тока, то задание  $E_{\text{тан}}$  на идеальной магн. стенке сводится к заданию магн. поверхностного тока:  $[n_1, E] = -\frac{4\pi}{c} j^m_{\text{пов}}$ . Таким сведением задач с заданными полями к задачам с заданными токами широко пользуются в теории дифракции волн, в частности в дифракции радиоволн.

Принцип перестановочной двойственности является представителем класса дискретных преобразований (см. Симметрия), оставляющих инвариантными М. у. Такого же сорта преобразованиями являются, в частности, операция обращения времени ( $\hat{T}$ )  $x_a \rightarrow x_a, t \rightarrow -t, E \rightarrow E, D \rightarrow -D, H \rightarrow -H, B \rightarrow -B, \rho^e \rightarrow \rho^e, j^e \rightarrow -j^e$ , операция зеркального отражения ( $\hat{P}$ )  $x_a \rightarrow -x_a, t \rightarrow t, E \rightarrow -E, j^e \rightarrow -j^e, H \rightarrow H, B \rightarrow B, \rho^e \rightarrow \rho^e$ , операция обращения знаков зарядов ( $\hat{C}$ )  $\rho^e \rightarrow -\rho^e, j^e \rightarrow -j^e, E \rightarrow -E, D \rightarrow -D, H \rightarrow -H, B \rightarrow -B$  и любые по-следовательно осуществляемые комбинации операций  $\hat{P}\hat{T}\hat{C}$ .

### 10. Максвелла уравнения в четырёхмерном представлении

Придавая времени  $t$  смысл четвёртой координаты и представляя её чисто мнимой величиной  $x_4 = ict$  (см. Минковского пространство-время), можно заключить описание электромагнетизма в компактной форму. Эл.-магн. поле в 4-описании может быть задано двумя антисимметричными тензорами  $H_{pq}$  и  $E_{pq}$ :

$$\{H_{03} = e_{03}, H_{12}, H_{21} = -iD_3\}, \quad (13)$$

$$\{E_{03} = e_{03}, E_{12}, E_{21} = iB_3\}, \quad (14)$$

где  $e_{03}$  — *Левы-Чивиты символ*, лат. индексы пробегают значения 1, 2, 3, 4, а греческие — 1, 2, 3. В 4-векторе тока объединены обычная плотность тока  $j^e$  и плотность электрич. заряда  $\rho^e$ :

$$j^e_p = (j^e, ic\rho^e),$$

аналогично вводит 4-вектор магн. тока.

В этих обозначениях М. у. допускают компактное 4-мерное представление:

$$\frac{\partial H_{pq}}{\partial x_q} = \frac{4\pi}{c} j^e_p, \quad (15 a)$$

$$\frac{\partial E_{pq}}{\partial x_q} = -\frac{4\pi}{c} j^m_p. \quad (15 b)$$

Взаимной заменой векторов поля и индукции в ф-лах (13), (14) вводится тензоры индукции эл.-магн. поля  $B_{pq}$  и  $D_{pq}$ :

$$\{B_{03} = e_{03}, B_{12}, B_{21} = -iE_3\}, \quad (16)$$

$$\{D_{03} = e_{03}, D_{12}, D_{21} = iH_3\},$$

через  $k$ -рые также могут быть записаны М. у.:

$$\frac{1}{2i} e_{pqk} \frac{\partial D_{pq}}{\partial x_k} = \frac{4\pi}{c} j^e_p, \quad (17)$$

$$\frac{1}{2i} e_{pqk} \frac{\partial B_{pq}}{\partial x_k} = \frac{4\pi}{c} j^m_p. \quad (18)$$

Любая пара тензорных ур-ний, содержащая в правых частях оба 4-тока (электрич. и магн.), тождественна системе М. у. Чаше используя вару ур-ний (15 a), (18), при этом материальные ур-ния сводятся к функциональной связи между тензорами  $H_{pq}$  и  $B_{pq}$  (последний чаще обозначают через  $F_{pq}$ ).

Из антисимметрии тензоров поля, индукции и М. у. в форме (17) — (18) следует равенство нулю 4-дивергенций 4-токов:

$$\frac{\partial}{\partial x_p} j^{e,m}_p = 0,$$

$k$ -рое представляет собой 4-мерную запись ур-ний непрерывности для электрич. (магн.) зарядов. Т. о., 4-векторы токов являются чисто вихревыми, и соотношения (17), (18) можно рассматривать как их представление в виде 4-роторов соответствующих тензоров.

Наряду с представленным здесь вариантом часто используется также 4-мерное описание, в  $k$ -ром временн. координата (обычно с индексом 0) берётся действительной, но 4-мерному пространству приписывается гиперболич. сигнатура (+, —, —, —); в таком пространстве приходится различать ко- и контравариантные компоненты векторов и тензоров (см. Ковариантность и контравариантность).

### 11. Лоренц-инвариантность Максвелла уравнений

Все экспериментально регистрируемые эл.-динамиц. явления удовлетворяют относительности принципу. Вид М. у. сохраняется при линейных преобразованиях, оставляющих неизменным интервал  $ds^2 = (dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2 - (dx_4)^2$  и составляющих 10-мерную Пуанкаре группу: 4 трансляции  $\Delta x_r$ , 3 пространственных (орто-)поворота ( $x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3$ ) и 3 пространственно-временных (орто-хоро-)поворота, иногда называемых лоренцевыми вращениями. Последние соответствуют лоренцевым системам отсчёта вдоль осей  $x_a$  с пост. скоростями  $dx_a/dx_4 = u_a/c = \text{const}$ . В частности, для  $\alpha = 1$  получается простейшая разновидность Лоренца преобразования:  $x'_{2,3} = x_{2,3}, x'_1 = \gamma(x_1 - u_1 t), t' = \gamma(t - u_1 x_1/c^2)$ , где  $\gamma = 1/\sqrt{1 - u_1^2/c^2}$ . Соответственно поля преобразуются по правилам:

$$E'_1 = E_1, \quad D'_1 = D_1, \quad B'_1 = B_1, \quad H'_1 = H_1,$$

$$E'_{2,3} = \gamma \left( E_{2,3} + \frac{1}{c} [uB]_{2,3} \right),$$

$$B'_{2,3} = \gamma \left( B_{2,3} - \frac{1}{c} [uE]_{2,3} \right),$$

$$H'_{2,3} = \gamma \left( H_{2,3} - \frac{1}{c} [uD]_{2,3} \right),$$

$$D'_{2,3} = \gamma \left( D_{2,3} + \frac{1}{c} [uH]_{2,3} \right).$$

Релятивистски-ковариантная запись М. у. позволяет легко находить инвариантные комбинации полей, токов и потенциалов (4-скаляров или инвариантов Лоренца группы), сохраняющихся, в частности, при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой. Во-первых, это чисто полевые инварианты (см. Инварианты электромагнитного поля). Во-вторых, это токовые (источниковые) инварианты:

$$j^{e,m}_p j^{e,m}_p = j^{e,m}_p j^{e,m}_p - c^2(\rho^e)^2 = \text{invar},$$

$$j^e_p j^m_p = j^e j^m - c^2 \rho^e \rho^m = \text{invar}.$$

В-третьих, это потенциальные инварианты:

$$A_p^{e,m} A_p^{e,m} = A^{e,m} A^{e,m} - \varphi^{e,m} \varphi^{e,m} = \text{invar},$$

$$A_p^e A_p^m = A^e A^m - \varphi^e \varphi^m = \text{invar},$$

где  $A^m, \varphi^m$  — магн. потенциалы (получающиеся из  $A^e$  и  $\varphi^e$  преобразованием перестановочной двойственности), источниками к-рых являются магн. токи  $j^m$  и заряды  $\rho^m$ . И, наконец, многочисл. комбинаров. инварианты типа  $f_p^e A_p^e = f^e A^e - c r^e \varphi^e = \text{invar}$  и им подобные. Число таких комбинаров. инвариантов (квадратов, кубичных и т. д.) по полям и источникам неограничено.

### 12. Лагранжиан для электромагнитного поля

М. у. могут быть получены из *наименьшего действия принципа*, т. е. их можно совместить с Эйлера — Лагранжа уравнениями, обеспечивающими вариационную экстремальность ф-ции действия:

$$S = \int_V \mathcal{L} dV dt,$$

а здесь  $\mathcal{L}$  — лагранжиан, являющийся релятивистски-инвариантной величиной; интегрирование ведётся по 4-мерному объёму  $V, (t_2 - t_1)$  с фиксиров. границами. В качестве обобщённых координат принято обычно использовать потенциалы  $A_\alpha$  и ф. Поскольку лагранж. формализм должен давать полное (замкнутое) динамич. описание системы, то при его построении нужно принимать во внимание материальные ур-ния. Они фигурируют как зависимости связанных зарядов и токов от полей  $B$  и  $E$ :

$$\rho_{\text{св}}^e = -\nabla P^e(B, E),$$

$$j_{\text{св}}^e = \frac{\partial}{\partial t} P^e(B, E) + \nabla P^m(B, E).$$

В результате лагранжиан принимает вид инвариантной комбинации полей, потенциалов и источников:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{8\pi} (E^2 - B^2) - \rho_{\text{св}}^e \varphi^e - \rho_{\text{св}}^e \varphi^e + \frac{1}{c} j^e A^e + \frac{1}{c} j_{\text{св}}^e A^e.$$

А ур-ния Эйлера — Лагранжа для нек-рой обобщённой координаты  $\psi = (\varphi, A_1, A_2, A_3)$  получают приравняв нулю соответствующих вариационных производных:

$$\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \psi} = \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \psi} - \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta (\partial \psi / \partial t)} \right) - \nabla_\alpha \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta (\nabla_\alpha \psi)} = 0.$$

Для  $\psi = \varphi$  приходим к (4), для  $\psi = A_1, A_2, A_3$  — к ур-нию (1) в соответствующих обозначениях. Вариационный подход позволяет придать теории универсальную форму описания, распространяемую и на описание динамики любых взаимодействий, даёт возможность получать ур-ния для комбинаров. динамич. систем, напр. электромагнитических. В частности, для систем с сосредоточенными параметрами, характеризующимся числом степеней свободы, соответствующие ур-ния наз. ур-ниями Лагранжа — Максвелла.

### 13. Единственность решений Максвелла уравнений

Различно теоремы единственности для стационарных и нестационарных процессов. Условия единственности нестационарных решений извлекаются из *Пойнтинга теорема*, где источники считаются заданными ф-циями координат и времени. Если бы они порождали два разл. поля, то разность этих полей в вакууме (или

в любой линейной материальной среде) вследствие принципа суперпозиции была бы решением однородных М. у. Для обращения этой разности в нуль  $\mu$ , следовательно, получения единств. решения достаточно удовлетворить след. трём условиям. 1) На поверхности  $S$ , окружающей область  $V$ , где ищется поле, должны быть заданы тангенциальные составляющие поля  $E_{\text{тан}}$  или поля  $H_{\text{тан}}$  либо соотношения между ними импедансного типа:  $E_{\text{тан}} = (c/4\pi) Z[\mu H]$  ( $\mu$  — нормаль к  $S$ ) со значениями  $Z$ , исключающими приток энергии извне. К такому относится, в частности, условия излучения (см. *Зоммерфельда условия излучения*), к-рым удовлетворяют волны в однородной среде на больших расстояниях от источников. Во всех случаях поток энергии для разностного поля вообще исчезает или направлен наружу (из объёма). 2) В нач. момент времени должны быть заданы все поля всюду внутри  $V$ . 3) Плотность энергии электромагнитного поля  $W = (1/8\pi)(E^2 + HB)$  должна быть положительна (вакуум, среды с  $\epsilon > 0, \mu > 0$ ). Эта частная теорема единственности обобщается на среды с неколокальными связями, а также на нек-рые виды параметрич. сред. Однако в нелинейных средах, где принцип суперпозиции не работает, никаких общих утверждений о единственности не существует.

В стационарных режимах нач. условия выпадают, и теоремы единственности формулируются непосредственно для установившихся решений. Так, в электростатике достаточно задать все источники  $\rho_{\text{ст}}^e$ , все полные заряды на изолиров. проводниках или их потенциалы, чтобы при соответствующих условиях на бесконечности (нужное спадание поля) решение было бы единственным. Аналогичные теоремы устанавливаются для магнитостатики и электродинамики пост. токов в проводящих средах.

Особо выделяется случай синусоидальных во времени процессов, для к-рых формулируют след. признаки, достаточные для получения единств. решения: 1) задание источников  $j^e(r)e^{i\omega t}$ ; 2) задание  $E_{\text{тан}}$  или  $H_{\text{тан}}$  на ограничивающей объём  $V$  поверхности  $S$  или соответствующих импедансных условий, обеспечивающих отсутствие потока вектора Пойнтинга внутрь  $V$ ; 3) наличие малого поглотителя внутри  $V$  или малой утечки энергии через  $S$  для исключения существования собств. колебаний на частоте  $\omega$ .

### 14. Классификация приближений Максвелла уравнений

Классификация приближений М. у. обычно основывается на безразмерных параметрах, определяющих и критерии подобия для эл.-магн. полей. В вакууме таким параметром является отношение  $a = \Delta L/c\Delta T$ , где  $\Delta L$  — характерный масштаб изменения поля (либо размер области, в к-рой ищется решение),  $\Delta T$  — характерный временной масштаб изменения полей.

а)  $a = 0$  — статич. приближение, статика. Система М. у. распадается на три.

И.

$$[\nabla E] = 0 \Rightarrow E = -\nabla \varphi,$$

$$\nabla \cdot D = 4\pi \rho,$$

$$D = E + 4\pi P^e(E) + 4\pi P_{\text{ст}}^e.$$

Материальная связь в простейшем случае имеет вид  $P^e(E) = \chi^e E$ . Это система М. у. для электростатики, в к-рой источниками служат заданные распределения плотности элетрич. зарядов  $\rho$  и сторонней поляризации  $P_{\text{ст}}^e$ . В однородной среде ( $\epsilon = \text{const}$ ) эл.-статич. потенциал  $\varphi$  определяется *Пуассона уравнением*

$$\Delta \varphi = -\frac{4\pi}{\epsilon} \rho.$$

Для более сложных материальных ур-ний различают электростатику анизотропных сред ( $D_a = \epsilon_{ab} E_b$ ), нелинейную электростатику [ $\epsilon = \epsilon(|E|)$ ], электростатику сред с пространственной дисперсией [ $\epsilon_{ab} = \epsilon_{ab}(k)$ ], важным частным случаем к-рых являются движущиеся среды с временной дисперсией (здесь может даже меняться тип ур-ния для потенциала с эллиптического на параболический) и т. п.

II. Поля в магнитостатике описываются ур-ниями

$$[\nabla H] = \frac{4\pi}{c} j,$$

$$\nabla B = 0 \Rightarrow B = [\nabla A],$$

$$B = H + 4\pi M(H) + 4\pi M_{ст},$$

где в случае простейшей материальной среды индукция, намагниченность определяется соотношением

$$M(H) = \chi^m H.$$

Источниками в ур-ниях магнитостатики являются заданные распределения плотности электрич. тока  $j$  и сторонней намагниченности  $M_{ст}$ . В однородной среде ( $\mu = \text{const}$ ) векторный потенциал магн. поля  $A$  (калибровка кулоновская) определяется векторным ур-нием Пуассона

$$\Delta A = -\frac{4\pi}{c} \mu j, \quad \nabla \cdot j = 0.$$

В общем случае возможны такие же разновидности сред, что и в электростатике.

III. К статич. электродинамике относят и процессы протекания пост. токов в распределенных проводящих средах. Токовая статика охватывается ур-ниями

$$j^e = \sigma(E + E_{ст}),$$

$$[\nabla E] = 0.$$

$$\nabla \cdot D = 4\pi \rho.$$

Источниками являются силы неэлектрич. происхождения, действующие на заряды, характеризующиеся напряженностью  $E_{ст}$ . Электрич. заряды присутствуют лишь в местах неоднородности среды, напр. на границах проводящих сред. Распределение токов в проводящих средах сопоставимо с распределением электрич. и магн. полей в электростатике и магнитостатике. Часто благодаря этой аналогии говорят, напр., о магн. цепях, по к-рым «текут» магн. потоки  $\Phi_B = \int B dS$ , аналогичные электрич. токам  $I = \int j dS$  в электрич. цепях.

б)  $a \ll 1$  — кваэистатика, обобщающая соответствующие статич. приближения.

В кваэизлектростатике вакуумные электрич. поля описываются ур-ниями статика (1), а в ур-ниях для магн. поля в качестве заданного источника фигурирует и ток смещения. Кваэимагнитостатика описывается статич. ур-ниями для магн. полей с учётом закона индукции (2) для электрич. поля. Поскольку вихревое электрич. поле меняет электрич. ток в проводниках, являющиеся источниками магн. поля, то этот раздел кваэистатики более богат, чем ирредуцируй; он описывает широкий круг явлений, происходящих в цепях перем. тока с сосредоточенными параметрами: ёмкостями, индуктивностями и сопротивлениями.

Кваэистатика в распределенных проводящих средах описывается ур-ниями кваэистационарного (кваэистатического) приближения, в к-рых ток смещения пренебрегают по сравнению с токами проводимости. В этом приближении распределения электрич. токов, электрич. и магн. полей описываются одинаковыми ур-ниями диффузионного типа:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{c^2}{4\pi\sigma\mu} \Delta H.$$

Эти ур-ния определяют, напр., распределение токов Фуко, проникновение перем. эл.-магн. поля в проводник (*скин-эффект*) и т. п.

в)  $a \sim 1$ . Резонансные волновые поля описываются точной системой М. у., однако их иногда выделяют из общего класса полей, особенно в тех случаях, когда их структура (пространственное распределение) фиксируется границами области, внутри к-рой эти поля могут быть возбуждены (напр., внутри полых резонаторов с металлическими стенками или в поперечном сечении волноводов либо в окрестности тонкой проволоки или щелевой антенны). При этом обычно обращаются к фурье-преобразованию М. у. и представляют поле в виде набора дискретных или кваэидискретных мод.

г)  $a \gg 1$ . В рамках этого неравенства существуют кваэизонич. и оптич. приближения (см. *Квантоптика, Геометрической оптики метод*), относящиеся и протяженным в масштабе длины волны распространениям полей (волновым пучкам, многомодовым конфигурациям и т. п.). Под характерным масштабом, входимым в параметр  $a$ , здесь подразумевается масштаб изменения амплитуды поля.

## 15. Максвелла уравнения в различных системах единиц

Выше использовалась симметричная гауссова абс. система единиц. Удобство гауссовой системы единиц состоит в том, что все 4 вектора поля  $E$ ,  $D$ ,  $H$ ,  $B$  обладают в ней одинаковыми размерностями ( $\text{r}^{1/2}\text{cm}^{-1/2}\text{c}^{-1}$ ) и потому в классическом «линейном» вакууме можно избежать введения ненужных констант: в силу  $E = D$ ,  $H = B$  безразмерные пронизываемости вакуума обращаются в единицы  $\epsilon_0 = 1$ ,  $\mu_0 = 1$ . Др. достоинством одинаковой размерности эл.-магн. полей является их естеств. объединение в единые тензоры поля вида (13), (14) без внесения корректирующих множителей.

Если принять запись ур-ния непрерывности в форме (5), а также соблюдение принципа дуальной симметрии, то М. у. можно придать вид

$$[\nabla H] = \alpha j + \beta \frac{\partial D}{\partial t},$$

$$[\nabla E] = -\beta \frac{\partial B}{\partial t},$$

$$\nabla B = 0,$$

$$\nabla D = \gamma \rho,$$

где константы  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  связывают соотношением

$$\alpha = \beta \gamma.$$

Для простейших материальных связей типа (10) можно ввести пронизываемости вакуума  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  и отнест. пронизываемости среды  $\epsilon = \epsilon/\epsilon_0$ ,  $\mu = \mu/\mu_0$ . Тогда из волнового ур-ния в вакууме следует естеств. соотношение между константами

$$\epsilon_0 \mu_0 c^2 \beta^2 = 1,$$

где  $c$  — скорость распространения любого эл.-магн. возмущения (в частности, света) в вакууме. В гауссовой системе  $\beta = 1/c$ ,  $\alpha = 4\pi/c$ ,  $\gamma = 4\pi$ ,  $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$ . Существует операция рационализации, предложенная Хевисайдом и состоящая в устранении иррациональных числовых множителей из М. у. Простейший путь ( $\alpha = 1/c$ ,  $\gamma = 1$ ) принят в рационализ. системе Хевисайда — Лоренца.

В *Международной системе единиц* (СИ) возникает дополнительная размерная константа, наз. импедансом (или характеристическим сопротивлением) вакуума  $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi$  Ом. Это представляет известные удобства при сопоставлении процессов распространения плоских волн в свободном пространстве с волнами напряжения и тока в линиях передач, но приходится

принимать вакуумные размерные значения произведений:

$$\epsilon_0 = \frac{10^9}{4\pi c^2}, \quad \frac{\Phi}{M},$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \quad \frac{T}{M}.$$

Значения коэф. в СИ:  $\beta = 1, \alpha = \gamma = 1, \epsilon_0 \mu_0 = c^{-2}$ .

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; и х же, Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Власов А. А., Максвелловская электродинамика, М., 1955; Никольский В. В., Теория электромагнитного поля, 3 изд., М., 1964; Джексоу Д. Ж., Классическая электродинамика, пер. с англ., М., 1965; Ицкевич Е. Б. и Б. З. Высокочастотная электродинамика, М., 1966; Стражев В. И., Томильчик Л. М., Электродинамика с магнитным зарядом, Минск, 1975; Медведев В. В., Начала теоретической физики, М., 1977; Нозовило в Ю. Я., Янни К. А., Электродинамика, М., 1978; Туров В. А., Материальные уравнения электродинамики, М., 1983; Фучич В. И., Никитин А. Г., Симметрии уравнений Максвелла, К., 1983; Бредов М. М., Румянцев В. В., Топтыгин Н. П., Классическая электродинамика, М., 1985. М. А. Миллер, Е. В. Суворов.

**МАКСВЕЛЛА — БОЛЬЦМАНА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ** — см. в ст. *Больцмана распределение*.

**МАКСИМАЛЬНАЯ РАБОТА** в термодинамике — 1) работа, совершаемая теплозаолиров. системой при обратном переходе из неравновесного состояния в равновесное (когда энтропия системы остается постоянной). 2) Работа, совершаемая системой в термостате при обратном переходе из одного равновесного состояния в другое. Эта М. р. равна изменению величины  $U - T_0 S + P_0 V$ , где  $U$  — внутр. энергия тела,  $S, V$  — его энтропия и объем,  $T_0, P_0$  — темп-ра и давление в термостате, отличающиеся от темп-ры  $T$  и давления  $P$  системы, т. е.

$$R_{\text{макс}} = -\Delta(U - T_0 S + P_0 V).$$

Предполагается, что в каждый данный момент система находится в равновесном состоянии, но не в равновесии со средой.

В частном случае, когда темп-ра и объем системы остаются неизменными, причём  $T = T_0, M. p.$  равна изменению свободной энергии (*Гельмгольца энергии*)  $F: R_{\text{макс}} = -(\Delta F)_{T, V}$ . В случае, когда постоянны темп-ра и давление системы, причём  $T = T_0, P = P_0, M. p.$  равна изменению *Гиббса энергии*:  $R_{\text{макс}} = -(\Delta G)_{P, T}$ . Предполагается, что состояние системы определяется не только  $T$  и  $V$  (или  $T$  и  $P$ ), но и др. параметрами, напр. при хим. реакциях или растворов. Эти параметры могут изменяться медленно.

Для адiabатич. процессов  $M. p.$  определяется изменением внутр. энергии  $U$  при заданных  $S$  и  $V$  или изменением *антальпии*  $H$  при заданных  $S$  и  $P$ :

$$R_{\text{макс}} = -(\Delta U)_{S, V}, \quad R_{\text{макс}} = -(\Delta H)_{S, P}.$$

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Статистическая физика, ч. 1, 3 изд., М., 1976, § 10, 20. Д. Н. Зубарев.

**МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ МЕТОД** — метод оценивания неизвестных параметров для распределения случайной величины  $x$  по наблюдению её реализаций при параметрич. анализе данных. М. п. м. был предложен Р. Э. Фишером (R. A. Fisher) в 1912 и формулируется след. образом. Пусть плотность вероятности величины  $x$  есть  $p(x|a)$ , где  $a$  — вектор неизвестных параметров. Определим ф-цию правдоподобия выражением

$$L(a|x) = P(x|a) = \prod_{n=1}^N p(x_n|a), \quad (1)$$

х-рое в отличие от плотности вероятности  $P(x|a)$  рассматривают как ф-цию вектора  $a$  при заданном векторе  $x$  реализовавшихся значений  $x_n$ . Оценкой М. п. м. наз. вектор  $\hat{a}$ , отвечающий максимуму выражения (1) и принадлежащий допустимой области значений  $a$ . Ча-

сто ищет максимум выражения  $l(a|x) = \ln L(a|x)$ , что упрощает задачу поиска  $\hat{a}$  для экспоненциальных распределений. Идея М. п. м. заключается в том, что данная реализация вектора  $x$  должна отвечать наиболее вероятному значению  $a$  и потому при заданном  $x$  выражение  $P(x|a)$  должно принимать макс. значение. Напр., время жизни  $t$  нестабильных частиц подчиняется распределению  $p(t|\tau) = \tau^{-1} \exp(-t/\tau)$ , где  $\tau$  — неизвестный параметр, характерный для каждой частицы. Пусть измерены времена жизни  $t_i$  для  $N$  распадов. Если пренебречь ошибками измерений  $t_i$ , то ф-ция правдоподобия равна

$$L(\tau|t) = \tau^{-N} \exp\left\{-\sum_{n=1}^N t_n/\tau\right\}.$$

Оценка М. п. м.  $\hat{\tau}$  получается из решения ур-ния правдоподобия

$$\partial l(\tau|t)/\partial \tau = -N/\tau + \tau^{-2} \sum_{n=1}^N t_n = 0$$

и равна  $\hat{\tau} = N^{-1} \sum_{n=1}^N t_n$ .

С М. п. м. связано неравенство Крамера — Рао: дисперсия  $D(a)$  оценки параметра  $a$ , полученной любым методом, удовлетворяет неравенству

$$D(a) \geq [1 + db(a)/da]^2 / \varphi(a), \quad (2)$$

где

$$b(a) = M(\hat{a}) - a = \int dx \hat{a}(x) P(x|a) - a$$

наз. смещением оценки  $\hat{a}$ , а

$$\varphi(a) = M\{[\partial l(a|x)/\partial a]^2\} = -M\{\partial^2 l(a|x)/\partial a^2\}$$

наз. кол-вом информации в  $x$  о параметре  $a$ . В случае вектора параметров  $a$  неравенство (2) обобщается след. образом. Если ввести ср. значения  $a_i$ ,

$$M(a) = a_i + b_i(a) \equiv g_i(a),$$

ковариационную матрицу

$$K_{ij} = M\left\{(\hat{a}_i - g_i(a))(\hat{a}_j - g_j(a))\right\},$$

матрицу  $\Delta_{ij} = \partial b_i(a)/\partial a_j$  и информац. матрицу

$$\varphi_{nm} = M\left\{\frac{\partial l}{\partial a_n} \frac{\partial l}{\partial a_m}\right\} = -M\left\{\frac{\partial^2 l}{\partial a_n \partial a_m}\right\},$$

то справедливо неравенство

$$K \geq [I + \Delta \Gamma], \quad (3)$$

где  $I$  — единичная матрица,  $\Gamma$  означает транспонирование. Если оценки  $\hat{a}_i$  являются несмещёнными, то для дисперсий  $\hat{a}_i$ , как это следует из (3), выполняется неравенство

$$D(a_i) \geq (\varphi^{-1})_{ii}.$$

Неравенство Крамера — Рао полезно тем, что позволяет ещё на стадии планирования эксперимента оценить достижимую точность измерения параметров изучаемых распределений.

При нек-рых ограничениях на  $p(x|a)$  можно показать, что оценка М. п. м. состоятельна, т. е. при  $N \rightarrow \infty$  один из корней ур-ния правдоподобия,  $\partial l(a|x)/\partial a = 0$ , стремится к точному значению  $a$ . Оценка М. п. м. асимптотически распределена по нормальному закону с пуловым ср. значением и дисперсией, равной  $\varphi^{-1}(a)$ .

При конечных  $N$  оценка М. п. м., вообще говоря, является смещённой. Оптим. свойством оценки М. п. м. при конечных  $N$  оказывается то, что при нек-рых условиях  $D(\hat{a})$  достигает нижней границы, задаваемой неравенством Крамера — Рао (2). В общем случае свой-

ства оценки М. п. м. можно изучить при помощи *Монте-Карло метода*: задавая выборку  $\alpha$  из области возможных значений, получают выборку  $x$ ; по  $x$  находят оценку  $\hat{\alpha}$  и строят её среднее значение и ковариационную матрицу. Другое функциональное свойство оценки М. п. м.: оценка  $\hat{f}$  функции  $f(\alpha)$  равна  $\hat{f} = f(\hat{\alpha})$ . В этом её преимущество перед оценкой по *наименьших квадратов методу*.

Лит.: Клеииков Н. П., Соколов С. Н., Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия, М., 1964; Рао С. Р., Линейные статистические методы и их приложения, пер. с англ., М., 1968; Кендэлл А. М. Статистика, статистические выводы и связи, пер. с англ., М., 1973; Статистические методы в экспериментальной физике, пер. с англ., М., 1976. В. П. Жириков.

**МАКСИМОН** — название гипотетич. частицы максимально большой массы в спектре масс элементарных частиц. Др. словами, термин «М.» (М. А. Марков, 1965) [1] предполагается, что спектр элементарных частиц ограничивается сверху массой определ. значения. По своему положению предельной частицы в спектре масс элементарных частиц М. должен обладать нек-рыми свойствами, связанными с фундам. параметрами, характеризующими свойства материи. Можно долагать, что не случайно из мировых констант  $c, h, G$  (гравитационная постоянная) можно единств. образом построить величину с размерностью массы, а именно:

$$m \sim \sqrt{\frac{hc}{G}} \sim 10^{27} \text{ г.} \quad (1)$$

Предполагается [1], что выражением (1) определяется масса М.

$$m_{\text{макс}} = \alpha \sqrt{\frac{hc}{G}}, \quad \text{где } \alpha \sim 1 \quad (2)$$

(вообще говоря,  $\alpha$  должна определяться из квантовой теории гравитации и, в конце концов, экспериментально). Частица такой массы — М. — действительно обладает ридом свойств, к-рые, в известном смысле, носят «предельный» характер. Так, её *гравитационный радиус* ( $r_{\text{гр}} \sim m_{\text{макс}} G/c^2$ ) оказывается равным комптоновской длине волны этой частицы

$$\lambda_{\text{СД}}/2\pi = \frac{h}{m_{\text{макс}} c} \sim \frac{m_{\text{макс}} G}{c^2}. \quad (3)$$

Массу М. можно получить из равенства (3), к-рое является предельным значением неравенства

$$\lambda_{\text{СД}}/2\pi \geq r_{\text{гр}}. \quad (4)$$

Этому неравенству, по-видимому, удовлетворяют все частицы, фигурирующие в литературе под термином «элементарные» [2]. При массе  $m > m_{\text{макс}}$  условие (4) не выполняется и такая частица выпадает из списка элементарных.

Физ. реальность М. в такой же мере (или даже более) несомненна, как и существование распадающихся *чёрных дыр* [3]. Если чёрные дыры существуют и распадаются за счёт хохинговского излучения, то, достигая в процессе распада массы  $\sim 10^{27}$  г, они становятся по своим свойствам М. с указанными выше параметрами. Вся масса М. заключена под сферой Шварцшильда с радиусом  $r_{\text{гр}} \sim mG/c^2$  с плотностью, выражаемой также через мировые константы,

$$\rho_{\text{макс}} \sim \frac{m_{\text{макс}}}{r_{\text{гр}}} \sim \frac{c^3}{hG^2} \sim 10^{64} \text{ г/см}^3. \quad (5)$$

Можно предполагать, что данная плотность материи представляет собой то же предельное значение, возможное при коллапсе звёзд и Вселенной (Марков, 1982 [4], Н. Рован, 1985 [5]).

Теоретически М. — богатое разнообразием семейство частиц. Они могут быть как электрически заряженными, так и нейтральными, обладать спином, внутренней предельно большой темп-рой или быть абсолютно холодными [6], представляться чёрной дырой как 1-го

рода, так и 2-го рода («серой дырой») [3]. Вопрос о возможной стабильности нек-рых из них является пока открытым. Наличие стабильных М. могло бы решить астрофиз. проблему *скрытой массы*.

Лит.: 1) М а р к о в М. А., Can the gravitational field prove essential for the theory of elementary particles?, «Prog. Theor. Phys. Suppl.», Extra number, 1965, p. 85; М а р к о в М. А., Элементарные частицы максимально больших масс (ивариант), «ЖЭТФ», 1966, т. 51, с. 878; 2) М а р к о в М. А., О «максимоне» и «минимоне» в свете возможной формулировки «элементарной теории», «Известия в ЖЭТФ», 1967, т. 45, с. 115; 3) Н о в и к о в И. Д., Ф о р о л о в В. П., Физика чёрных дыр, М., 1986; 4) М а р к о в М. А., Предельная плотность материи как универсальный закон природы, «Известия в ЖЭТФ», 1982, т. 38, с. 214; 5) Р о с е н Н., General relativity cosmological models without the big bang, «Astrophys. J.», 1985, v. 297, p. 347; 6) М а р к о в М. А., О природе материи, М., 1976, с. 210—13. М. А. Мирнов.

**МАКСИМУМА МОДУЛЯ ПРИНЦИП** — утверждение, согласно к-рому *аналитическая функция* одного или неск. комплексных переменных, отличаясь от постоянной не может внутри области аналитичности достигнуть своего максимального по абс. величине значения. В частности, если  $f(z)$  — аналитич. ф-ция в области  $D$ , и в нек-рой окрестности  $U$  точки  $z_0 \in D$  имеет место неравенство  $|f(z)| \geq |f(z_0)|$ ,  $z \in U$ , то  $f(z)$  постоянна в  $D$ . Если  $f(z)$  аналитична в  $D$  и непрерывна в замыкании  $\bar{D}$ , то ф-ция  $|f(z)|$  достигает своего макс. значения на границе области  $D$ .

Лит. см. при ст. *Аналитическая функция*. Б. И. Зювлялов.

**МАЛОУГЛОВЕЕ РАССЕЯНИЕ** — упругое рассеяние эл.-магн. излучения или пучка частиц (электронов, нейтронов) на неоднородностях вещества, размеры к-рых существенно превышают длину волны излучения (или деброевскую длину волны частиц); направления рассеянных лучей при этом лишь незначительно (на малые углы) отклоняются от направления падающего луча. В зависимости от параметров излучения М. р. может быть обнаружено при рассеянии на неоднородностях разл. масштабов: от  $\sim 10^{-15}$  м и менее (рассеяние электронов на ядрах) до метров и километров (рассеяние радиоволн на неоднородностях земной поверхности). Распределение интенсивности рассеянного излучения зависит от строения рассеивателя, что используется для изучения структуры вещества.

В структурных исследованиях вещества используют, как правило, рентг. излучение или тепловые нейтроны с длиной волны  $\sim 1-10 \text{ \AA}$  ( $10^{-1}-1 \text{ нм}$ ). С их помощью изучают неоднородности коллоидных размеров ( $\sim 10^{-10}-10^2 \text{ \AA}$ ). В отличие от др. дифракц. методов (*рентгеновского структурного анализа, нейтронографии, электронографии*), с помощью М. р. исследуют структуру разупорядоченных объектов. Иногда М. р. — единств. метод получения прямой структурной информации о системах с хаотическим расположением неоднородностей коллоидных размеров; наличие М. р. уже является доказательством присутствия в среде таких неоднородностей. Неоднородности же, имеющие размеры порядка межмолекулярных расстояний, на малоугловую часть дифракц. картин не оказываются.

С помощью М. р. изучают строение биол. молекул в растворе, объёмные дефекты в кристаллич. веществах, кластерную структуру жидкостей и аморфных тел, поры в разл. пористых материалах и т. д.

Воанаконение метода М. р. связано с работами А. Гинье (A. Guinier) по изучению надмолекулярного строения силванов (1938). В 1950-х гг. Г. Пород (G. Porod), О. Кратки (O. Kratky) и В. Луаззати (V. Luzzati) развили теоретич. основы метода и разработали принципы конструирования установок для М. р. С кон. 1960-х гг. начался новый этап развития М. р., к-рый характеризуется широким применением нейтронного и синхротронного излучения и позиционно-чувств. детекторов, а также новых методов анализа данных (аварияция контраста, аномальное рассеяние, прямые методы).

Основы теории малоуглового рассеяния. При рассеянии излучения на неоднородностях с линейным разме-

ром  $D$  осн. доля рассеянного излучения сосредоточена в области векторов рассеяния:

$$|s| = 4\pi\lambda^{-1}\sin\theta \leq 2\pi/D, \quad (1)$$

где  $s = k - k_0$ ,  $k_0$  и  $k$  — соответственно волновые векторы падающей и рассеянной волн,  $|k| = |k_0| = 2\pi/\lambda$ ,  $2\theta$  — угол рассеяния,  $\lambda$  — длина волны падающего излучения. Если  $D \gg \lambda$ , то  $\theta \ll 1$ , т. е. рассеянное излучение сосредоточено вблизи перпендикулярного направления ансамблем  $N$  идентичных атомов (мотивов атомов) с рассеивающей способностью (формфактором, см. Атомный фактор)  $f(s)$ , равна

$$\langle I(s) \rangle = \langle N \rangle \langle f^2(s) \rangle + \langle N \rangle \frac{\langle f(s) \rangle^2}{v_1} \int_0^\infty [1 - P(r)] \frac{\sin sr}{sr} 4\pi r^2 dr, \quad (2)$$

где знак  $\langle \dots \rangle$  означает усреднение по ансамблю  $N$  частиц,  $v_1 = V_0 \langle N \rangle$ ,  $V_0$  — облучаемый объём образца,  $P(r) - t. n.$  парная корреляция. Ф-ция,  $r$  — расстояние между частицами. Первый член в (2) отвечает независимому рассеянию на мотивах атомов, второй — интерференции при рассеянии на этих мотивах.

Рассеивающие мотивы атомов иногда можно рассматривать как нек-рые частицы, включённые в однородную матрицу осн. вещества. Тогда ур-ние (2) соответствует т. н. разностной кривой рассеяния (разности интенсивностей излучений рассеяющего всей системой и рассеянного матрицей осн. вещества). Если описывать рассеивающие мотивы атомов ф-цией распределения рассеивающей плотности  $\rho(r)$ , а плотность частиц матрицы обозначить  $\rho_0$ , то разность

$$\Delta\rho = \langle \rho(r) \rangle - \rho_0, \quad (3)$$

является интегральной характеристикой объекта, показывая, насколько эти частицы «выделяются» на фоне окружающей среды; эта разность наз. контрастом  $\rho$  атом частицы относительно матрицы.

Если  $\rho_0$  мало, то 2-м членом в (2) можно пренебречь (или исключить его с помощью последоват. экспериментов с веществами, характеризующимися различными  $\rho_0$ ). В этом случае

$$\langle I(s) \rangle = \langle N \rangle \langle f^2(s) \rangle, \quad (4)$$

т. н. интенсивность М. р. пропорциональна усреднённой по всем направлениям интенсивности рассеяния одной частицы. Если частицы неидентичны, то

$$\langle I(s) \rangle = \langle N \rangle \int_0^\infty \langle f^2(s, R) \rangle D_N(R) dR, \quad (5)$$

где  $R$  — нек-рый характерный размер частицы,  $f(s, R)$  — формфактор частицы с этим размером,  $D_N(R)$  — распределение частиц по  $R$ .

В тех случаях, когда систему нельзя представить в виде рассеивающих мотивов атомов, вкрапленных в матрицу осн. вещества, М. р. может быть вызвано разл. причинами. Так, в однофазных объектах (напр., в жидкости) М. р. может быть обусловлено статистич. флуктуациями плотности, причём

$$I(0) = f^2(0) \langle N \rangle \frac{kT\beta}{v_1}, \quad (6)$$

где  $\beta$  — коэф. изотермич. сжимаемости жидкости. Если система многофазная, рассеяние возникает как за счёт флуктуаций плотности, так и вследствие различия плотностей рассеивающих фаз. Для бинарных систем, изотропное рассеяние на флуктуациях состоит из двух членов  $S_{NN}(s) + S_{CC}(s)$ , первый из к-рых обусловлен флуктуациями плотности, второй — флуктуациями концентрации. При резких границах фаз в качестве контраста будет выступать среднеквадратичная флуктуация

$$\langle \Delta\rho \rangle^2 = (\rho_1 - \rho_2)^2 \Phi_1 \Phi_2, \quad (7)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности рассеивающих фаз,  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — их объёмные доли,  $\Phi_1 + \Phi_2 = 1$ . В этом случае М. р. даёт информацию об интегральных характеристиках объекта (объёмные доли фаз, поверхность раздела и др.).

Интерпретация данных малуглового рассеяния. Для изотропных монодисперсных систем усреднённая по всем ориентациям интенсивность рассеянного излучения запишется в виде

$$I(s) = \int_V \int_V \langle \rho(r_1) \rho(r_2) \rangle \frac{\sin sr_{12}}{sr_{12}} dr_1 dr_2 \quad (8)$$

(ф-ла Дебая). Здесь интегрирование ведётся в пределах объёма частицы  $V$ , а  $r_{12} = |r_1 - r_2|$ . Интенсивность  $I(s)$  связана с усреднённой саморезной плотностью (корреляц. ф-цией) частиц соотношением

$$\gamma(r) = \langle \rho(r) * \rho(-r) \rangle = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty I(s) \frac{\sin sr}{sr} s^2 ds. \quad (9)$$

Ф-ции  $I(s)$  и  $\gamma(r)$  для простейшего случая однородного шара приведены на рис. 1, 2. Из кривой рас-

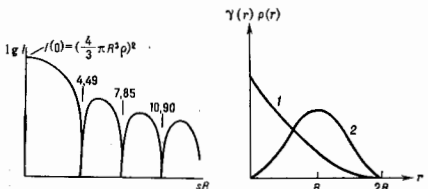


Fig. 1. Кривая интенсивности рассеяния однородным шаром радиуса  $R$  и плотности  $\rho$ :  $I(s) = (\frac{4}{3}\pi R^3 \rho^2) [3(\sin sR - sR \cos sR)/(sR)^3]$ .

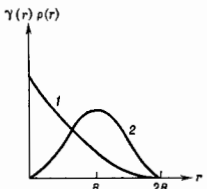


Fig. 2.  $\gamma(r)$  — Корреляционная функция  $\gamma(r)$ ;  $\xi$  — функция  $\xi(r)$  распределения частиц по расстояниям  $r$ ;  $\xi(r) = r^2 \gamma(r)$ .

сеяния можно определить ряд интегральных параметров частицы (т. н. инвариантов). При  $s \rightarrow 0$  имеем

$$I(s) \approx I(0) \exp(-s^2 R_g^2 / 3), \quad (10)$$

$R_g$  — радиус инерции частицы (ф-ла Гинье); из условия  $\gamma(r) \equiv 0$  при  $r > l_{\text{макс}}$  определяется её макс. размер  $l_{\text{макс}}$ . Т. н. инвариант Порода

$$Q = \int_0^\infty s^2 I(s) ds = 2\pi^2 \int_V \int_V \rho(r) dr \quad (11)$$

пропорционален квадрату контраста частицы относительно матрицы. При условии однородности частиц можно, кроме этого, определить её объём:

$$v = 2\pi^2 I(0) / Q, \quad (12)$$

а также асимптотич. убывание  $I(s)$  при  $s \rightarrow \infty$ :

$$I(s) \approx c_4 / s^4, \quad c_4 = \frac{Q}{\pi} \frac{S}{v}, \quad (13)$$

где  $S$  — площадь поверхности частицы. Для сильно вытянутых и сильно сложенных частиц можно определять соответственно параметры поперечного сечения и толщины.

При заданных инвариантах кривая рассеяния существенно зависит от формы частицы (рис. 3). Это служит основой для метода моделей, где с учётом вычисленных инвариантов и информации, полученной др. методами, рассчитываются интенсивности рассеяния деск. (как правило, однородными) моделями и сравниваются с экспериментом.

Дополнит. информацией о внутр. структуре частицы можно получить с помощью т. в. метода вариации контраста. При изменении рассеивающей плотности матрицы справедлива ф-ла

$$I(s) = (\Delta\rho)^2 I_C(s) + 2\Delta\rho I_{CS}(s) + I_S(s), \quad (14)$$

где  $I_C(s)$  — рассеяние «формой» частицы,  $I_S(s)$  — рассеяние на её неоднородностях (т. е. при  $\Delta\rho = 0$ ),  $I_{CS}(s)$  — перекрёстный член. Аналогичные зависимости можно записать и для инвариантов. Для многокомпонентных частиц можно также «заменить» одну из компонент (поместив рассеивающие частицы в среду с плотностью, равной плотности этой компоненты) аналогично тому, как это делается в оптике (см. *Иммерсионный метод*), и наблюдать рассеяние на остальных компонентах.

Вариация контраста может быть применена и в несколько другом виде, когда изменяют не плотность матрицы, а плотность отд. участков частицы и, анализируя изменения в кривой рассеяния, находят расстояния между этими участками. В М. р. рентг. излучения для этого присоединяют к частице тяжёлотомные метки (вводят в молекулы тяжёлые атомы), в М. р. нейтронов применяют изотопное замещение. Вариаций конт-

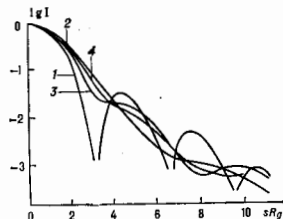


Рис. 3. Нормированные интенсивности малуголового рассеяния частицами различной формы с одинаковыми  $R_0$  и  $\tau$ : 1 — шаровой слой; 2 — трёхосный эллипсоид с отношением осей 0,5 : 1 : 1,5; 3 — четыре соприкасающихся эллипсоида вращения; 4 — литая модель по мотивам модели 3.

раста удаётся добиться в рентгеновских экспериментах также с использованием *аномального пропускания эффекта*.

Существуют также прямые методы интерпретации интенсивности М. р., где при определ. ограничений удаётся восстанавливать структуру частиц — ф-цию  $\rho(r)$ . Простейший случай — сферически-симметричная частица. В этом случае

$$\rho(r) = \rho(r) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty (\pm \sqrt{I(s)}) \frac{\sin sr}{sr} s^2 ds \quad (15)$$

и для восстановления структуры требуется установить знак для амплитуд рассеяния  $\sqrt{I(s)}$ . Для аксиально-симметричных частиц удаётся с помощью разложения по сферическим гармоникам синтезировать ограниченное число возможных решений, выбор между которыми ведётся с помощью дополнит. информации.

Осн. класс монодисперсных объектов, изучаемых методом М. р., — растворы биополимеров и их комплексов. Метод позволяет определять общие геометрические и весовые характеристики биол. частиц, их форму, а иногда и детали внутр. структуры. На рис. 4 приведен пример восстановления структуры бактериального вируса Т7 в растворе с помощью прямого метода.

Для полидисперсных систем частиц наиб. актуальна задача восстановления ф-ции распределения по размерам  $D_N(R)$  из ур-ния

$$I(s) = \int_0^\infty I(sR) D_N(R) dR. \quad (16)$$

Функцию  $D_N(R)$  определяют методом М. р. для раствора полимеров, пористых материалов, металлов и сплавов и т. д.

Помимо этого, возможно определение усреднённых по ансамблю значений инвариантов, с помощью к-рых рассчитываются общие характеристики дисперсной фазы. В частности, для двухфазных систем

$$Q = 2\pi^2 \Phi_1 \Phi_2 (\rho_1 - \rho_2)^2 v_0, \quad (17)$$

$$S_0/v_0 = \Phi_1 \Phi_2 Q,$$

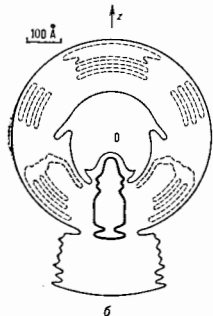
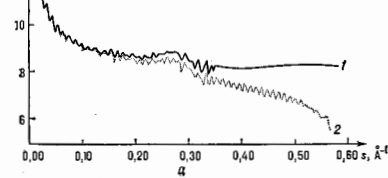


Рис. 4. а — Кривые рентгеновского рассеяния бактериофагом Т7 в растворе (1 — экспериментальная кривая; 2 — рассеяние восстановленной структуры); б — восстановление по данным малуголового рассеяния структура Т7; рассчитанная в аксиально-симметричном приближении карта электронной плотности (сечение, содержащее ось вращения з). Сплошные изолинии соответствуют электронной плотности  $0,38\text{e} \cdot \text{А}^{-3}$  (гидратированный белок), штриховые —  $0,42\text{e} \cdot \text{А}^{-3}$  (слабогидратированная ДНК), жирная линия —  $0,52\text{e} \cdot \text{А}^{-3}$  (слабогидратированная ДНК).

где  $S_0$  — площадь поверхности раздела фаз. Для получения дополнит. информации о системе исследуют разл. модифицируют метод вариации контраста.

М. р. используется также для определения строения частично упорядоченных объектов — т. н. о р и е н т и р о в а н н ы х систем. В частности, при изучении слоёных структур (кристаллы, полимеры, жидкие кристаллы, тонкие плёнки) по меридиональным отражениям определяются толщина слёбов D и профиль рассеивающей плотности по нормали к плоскости слёв  $\rho(x)$ . Для центросимметричного случая

$$\rho(x) = \frac{F_0}{D} + \frac{2}{D} \sum_n \pm |F_n| \cos(-2\pi n x/D), \quad (18)$$

где  $F_n$  — амплитуда n-го рефлекса.

Знание профиля электронной плотности позволяет исследовать детали упаковки молекул разного сорта, в частности мультислоёвыми структурами. На рис. 5 и 6 приведены рентгенограммы М. р. и распределение  $\rho(x)$  для сверхрешётки из двух видов молекул беггата бария и октадецилофола.

Техника эксперимента. Т. к. распределение интенсивности М. р. рентг. лучей с тепловых нейтронов



измеряется под малыми углами, осн. требование к ас- керим. технике заключается в создании достаточно узкого нерасходящегося пучка первичного излучения. Этого достигают с помощью спец. коллиматор. систем и экранирования его паразитного рассеяния на краях щелей, окнами кювет с образцами, держателями, частями воздуш- ных на пути распространения луча и т. д. На рис. 7, а, б приведены наиболее распространенные схемы

Рис. 5. Малоугловые рентгенограммы ленточных пленок бензата бария (Бег. Ва) и октадециленола (ОДФ): 1 — сверхрешётка с чередованием библиев Бег. Ва и ОДФ (10 слоев); 2 — пленка из библиев ОДФ; 3 — пленка из библиев ОДФ.

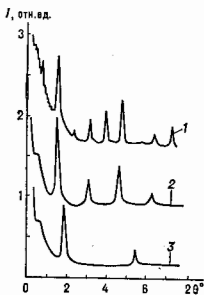


Рис. 6. Профиль электронной сверхрешетки (кривая 1) и схема расположения молекулы Бег. Ва и ОДФ в блоках. Период сверхрешетки  $D = 109 \text{ \AA}$ .

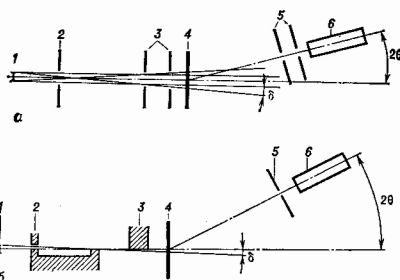
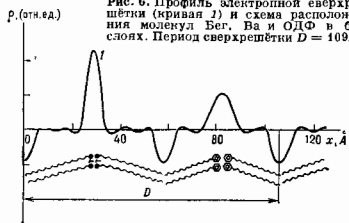


Рис. 7. Схемы малоугловых гониометров: а — трёхщелевая; б — по Кратки; 1 — фокус источника; 2 — формирующие щели; 3 — щели образца; 4 — образец; 5 — приемные щели; 6 — детектор ( $2\theta$  — угол рассеяния);  $\delta$  — угловая расходимость падающего пучка).

коллимации первичного пучка — трёхщелевая и схема блок-коллиматора по Кратки.

Источниками рентг. излучения в экспериментах М. р. служат как обычные рентг. трубки, так и трубки с вращающимся анодом, а также *синхротронное излучение*. Для регистрации рассеянного излучения используют одноканальные ионизационные счётчики; широкое распространение получают позиционно-чувствительные детекторы, позволяющие регистрировать одновременно всю картину М. р. Источниками тепловых нейтронов служат спец. нейтронные реакторы.

Обработка экспериментальных данных. В приведенные выше соотношения между структурными характеристиками вещества и интенсивностью М. р. входит ф-ция  $I(s)$  — точная кривая рассеяния объектом. На практике всегда измеряется некий-ряд дискретный набор данных  $J(s_i)$ , содержащий разл. приборные искажения, фоновое рассеяние и статистич. шум. В общем виде для регистрируемой интенсивности рассеяния можно записать

$$J(s_i) = \alpha_1 J(s_i) + \alpha_2 J(s_i) + \epsilon_i$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — нормировочные константы,  $J(s_i)$  — рассеяние матрицы, деталями установки и пр.,  $\epsilon_i$  — погрешности измерений. Кривая  $J(s)$ , несущая структурную информацию, отвечает «идеальной» кривой  $I(s)$ , «разной» эффектами расходимости пучка и немонохроматичности излучения. Для изотропного рассеяния связь между  $J(s)$  и  $I(s)$  записывается в виде

$$J(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} W_w(u) W_l(t) W_\lambda(\lambda) \frac{I \sqrt{(s-u)^2 + t^2}}{\lambda} du dt d\lambda, \quad (19)$$

где  $W_w(u)$  и  $W_l(t)$  — т. н. весовые ф-ции ширины и высоты коллимирующих щелей (приборные ф-ции прохождения вдоль и поперек направления регистрации в плоскости приёмника),  $W_\lambda(\lambda)$  — спектральная ф-ция (распределение по длинам волн излучения в падающем пучке). В реальных экспериментах искажения ф-ции  $I(s)$  могут быть весьма значительны (особенно из-за аффектов размыва на высоту щелей, в нейтронном рассеянии — из-за немонохроматичности излучения). Поэтому обработка данных, связанная с решением интегрального ур-ния (19), представляет собой, как правило, необходимый предварит. этап при извлечении структурной информации из данных М. р.

Лит.: Guinier A., Fournet G., Small-angle scattering of X-ray, N. Y. — L., 1955; Small-angle X-ray scattering, ed. by O. Glatter, O. Kratky, L., 1982; Останевич Ю. М., Сердюк И. И., Нейтроннографическое исследование структуры биологических макромолекул, «УФН», 1982, т. 137, с. 85; Черемская П. Г., Методы исследования пористости твердых тел, М., 1985; Свиргу и Д. И., Фейн и Л. А., Рентгеновое и нейтронное малоугловое рассеяние, М., 1985; Физико-химия многокомпонентных полимерных систем, под ред. Ю. С. Ливатова, т. 1—2, К., 1988.

Д. И. Свиргу, Л. А. Фейн.

**МАЛЮСА ЗАКОН** — зависимость интенсивности линейно поляризованного света после его прохождения через *анализатор* от угла  $\alpha$  между плоскостями поляризации падающего света и анализатора (см. *Поляризация света*). Установлен Э. Л. Малюса (E. L. Malus) в 1810. Если  $I_0$  и  $I$  — соответственно интенсивности падающего на анализатор и выходящего из него света, то, согласно М. з.,  $I = I_0 \cos^2 \alpha$ . Свет с иной (не линейной) поляризацией может быть представлен в виде суммы двух линейно поляризованных составляющих, к каждой из к-рых применим М. з. По М. з. рассчитываются интенсивности проходящего света во всех *поляризационных приборах*. Потери на отражение, зависящие от  $\alpha$  и не учитываемые М. з., определяются дополните- лью.

**МАНДЕЛСТАМА ПРЕДСТАВЛЕНИЕ** (двойное спектральное представление) — простейшее интегральное представление для амплитуды рассеяния элементарных частиц (см. *Дисперсионный соотношений метод*) как ф-ции инвариантных квадрата полной энергии  $s$  в центре центра масс и квадрата передачи 4-импульса  $t$ .

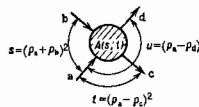


Рис. 1.

В простейшем случае бинарного процесса  $a + b \rightarrow c + d$  (рис. 1) упругого рассеяния частиц с равными массами  $m$  (напр., двух нейтронов). М. п. имеет вид

$$A(s, t) = \frac{1}{\pi^2} \iint ds' dt' \frac{\rho_{in}(s', t')}{(s'-s)(t'-t)} + \frac{1}{\pi^2} \iint du dv dt' \frac{\rho_{in}(u', v', t')}{(u'-u)(t'-t)} + \frac{1}{\pi^2} \iint du dv ds' \frac{\rho_{in}(u', v', s')}{(u'-u)(s'-s)}$$

где действительные инвариантные переменные  $s = (p_a + p_b)^2$ ,  $t = (p_a - p_c)^2$ ,  $u = (p_a - p_d)^2$  связаны друг с другом соотношением  $s + u + t = 4m^2$  ( $p_a, p_b, c, d$  —

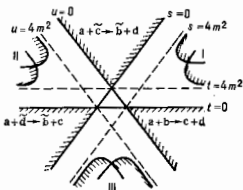


Рис. 2. Области аналитичности амплитуды процесса  $a + b \rightarrow c + d$  (в случае одинаковых масс частиц). I, II, III — области, где отличны от нуля спектральные плотности  $\rho$ . Заштрихованные области перекрестных процессов.

4-импульсы частей  $a, b, c, d$ ; используется система единиц, в к-рой  $c = 1$ ), а спектральные плотности  $\rho$  отличны от нуля только в областях I, II, III (рис. 2), так что амплитуда  $A$  аналитична при всех комплексных  $s$  и  $t$  за исключением этих вещественных областей. М. п. задает и аналитич. свойства амплитуды как ф-ции одной комплексной переменной ( $s$  или  $t$ ) — это разрезы, определяемые асимптотами границы спектральных ф-ций;  $s > 4m^2$ ,  $t > 4m^2$ ,  $u > 4m^2$ .

Важным свойством М. п. является его явная *перекрестная симметрия*: она определяет единую аналитич. ф-цию, к-рая в разных областях переменных  $s$ ,  $u$  описывает разл. перекрестные процессы (рис. 2).

Представление предложено С. Манделштамом (S. Mandelstam) в 1959 и строго доказано в квантовой механике с потенциалом взаимодействия определ. класса. Характерной особенностью М. п. в этом случае является нулевое значение спектральной плотности  $\rho_{in}$ . Однако в квантовой теории поля его удалось доказать лишь в рамках *перенормированной теории возмущений*.

М. п., наряду с *унитарности условием*, составляет основу дисперсионного подхода в теории элементарных частиц. Связывая амплитуды разл. процессов, оно приводит к системе нелинейных интегральных ур-ний. Однако возникающая система оказывается настолько широкой, что включает в себя амплитуды практически всех процессов, происходящих с элементарными частицами, и не поддается матем. разрешению. В ряде случаев с помощью разл. приближений удается сузить систему и получить интересные физ. результаты. М. п. прочно вошло в арсенал аналитич. методов теории элементарных частиц и лежит в основе многих моделей, напр. *струнных моделей адронов* (см. также *Двухность*).

Лит.: Ширков Д. В., Серебряков В. В., Мещеряков В. А., Дисперсионные теории сильных взаимодействий при высоких энергиях, М., 1967; Бокгоф В. П., Н. Я., Логанов А. А., Тодоров И. Т., Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля, М., 1969; Игнатов К., Зюбер Ж.-Б., Квантовая теория поля, пер. с англ., т. 1, М., 1984.

А. В. Ефремов.

**МАНДЕЛЬШТАМ — БРИЛЛЮЗНА РАССЕЯНИЕ** (МБР) — рассеяние света на диатриач. флуктуациях плотности конденсиров. сред, сопровождающееся изменением частоты. В спектре МБР монохроматич. света наблюдаются дискретные, расположенные симметрично относительно частоты возбуждающего света спектральные компоненты, называемые компонентами Манделштама — Бриллюэна или компонентами тонкой структуры линии Рэлея. Рассеяние предсказано Л. И. Ман-

дельштамом (1918—26) и Л. Н. Бриллюэном (L. N. Brillouin, 1922); обнаружено при рассеянии в кристалде кварца и в жидкости Е. Ф. Гроссом (1930) и впоследствии им же подробно исследовано.

Адиабатич. флуктуации плотности можно представить как результат интерференции распространяющихся в среде по всевозможным направлениям упругих волн разл. частоты со случайными фазами и амплитудами (т. е. дебаевских волн, к-рые рассматриваются в *Дебаз законе теплоемкости*). Плоская световая волна, распространяющаяся в такой среде, дифрагирует (рассеивается) во всех направлениях на этих упругих волнах, модулирующих диалектрич. проницаемость среды. Каждая из упругих волн создаст периодич. решётку, на к-рой и происходит дифракция света аналогично дифракции света на *узлы решетки*. Максимум интенсивности света, рассеянного на упругой волне с длиной волны  $\lambda$ , наблюдается в направлении  $\theta$  (рис.), отвечающем *Брэгга — Вульфа условию*

$$2n\lambda \sin\theta/2 = \lambda, \quad (1)$$

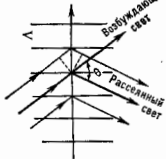
где  $n$  — показатель преломления,  $\lambda$  — длина волны света в вакууме. Поскольку каждая упругой волна, распространяющейся в нол-ром направлении со скоростью  $v$ , соответствует волне той же частоты, будучая настречу, можно считать, что в среде имеются стоячие упругие волны, временное изменение плотности в к-рых с частотой  $f = v/\lambda$  вызывает модуляцию рассеянного света. Следовательно, в рассеянном свете появляются дискретные компоненты с частотой  $\nu \pm \Delta\nu$  (стоковая и антистоковая), где  $\Delta\nu = f$ . Условие  $\nu \pm \Delta\nu$  приводит к выводу, что для отстоят. изменения частоты света, рассеянного в направлении  $\theta$ :

$$\Delta\nu/\nu \approx \pm 2n(v/c)\sin\theta/2, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме. Рассмотрение отражения света от бегущих упругих волн в направлении, соответствующем условию (1), приводит к такому же результату. Изменение частоты в этом случае обусловлено *Допплер эффектом*. Ширина компонент Манделштама — Бриллюэна  $\delta\nu$  определяется коэф. затухания  $\alpha$  ( $\text{см}^{-1}$ ) упругих волн  $\delta\nu = \alpha v/2\lambda$ .

Поскольку обычно  $f = \Delta\nu \ll \nu$ , смещение частоты при МБР относительно невелико:  $\Delta\nu/\nu \approx 2v/c \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ . Такие величины измеряются интерферометрич. методами, напр. *интерферометром Фабри — Перо*. Существенным и хорошо наблюдаемым оказывается МБР видимого света ( $\nu \sim 10^{14}$  Гц) на *гиперзвуке* ( $f \sim 10^9 - 10^{10}$  Гц). В жидкостях наблюдаются 2 компонента Манделштама — Бриллюэна, в твёрдом аморфном теле — 4 компонента, 2 из к-рых вызваны продольными и 2 — поперечными гиперзвуковыми волнами при  $\theta$ , отличным от нуля. В кристалле в общем случае вследствие анизотропии скоростей распространения гиперзвука (3 различные скорости для каждого направления) и анизотропии распространения возбуждающего и рассеянного света (4 возможные комбинации для состояний поляризации падающего и рассеянного света) должно наблюдаться 24 компонента Манделштама — Бриллюэна. Кроме того, во всех случаях наблюдается также смещение на частоте центр. компонента тонкой структуры, вызванная рассеянием на изобарич. флуктуациях энтропии (см. *Рассеяние света*).

При обычных (нелазерных) источниках света световая волна не влияет на состояние среды и вызывающее рассеяние упругие волны обусловлены только тепловым движением молекул. Такое рассеяние света называется *рассеянием*. Когда интенсивность световой волны дост-



Рассеяние света на упругой волне.

таточно велика (напряженность электрич. поля возм.  $\sim 10^6 \sim 10^8$  В/см сравнима с внутриатомным полем), развивается процесс в направлении распада и я. Мандельштама — Бриллюэна. В этом случае бегущая интерференц. картина электрич. полей возбуждающей и рассеянной световых волн усиливает те упругие волны, к-рые вызвали неравнозначное тепловое рассеяние. Механизм усиления обусловлен силами *электрострикции*, стягивающими вещество в места с большим локальным значением напряженности электрич. поля и усиливающим таким образом упругие волны. Рост амплитуды упругих волн приводит к соответствующему увеличению эффективности рассеяния, а это в свою очередь усиливает упругие волны. В результате интенсивность рассеянной волны нелинейно возрастает по мере распространения в среде. В процессе вынужденного МБР возникает интенсивный генеризм, верх. граница частоты к-рого  $\sim 10^6$  МГц для твердого тела и  $\sim 10^2 \sim 10^4$  МГц для жидкости.

Исследование МБР позволяет получать ценную информацию о свойствах рассеивающей среды. Практич. ценность явления вынужденного МБР связана с возможностью управлять с его помощью параметрами лазерного излучения и в первую очередь с возможностью осуществлять *обращение волнового фронта*.

Лит.: Фабелинский И. Л., Молекулярное рассеяние света, М., 1965; Старинов В. С., Фабелинский И. Л., Вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна, *УФН*, 1969, т. 38, с. 441.

МАРГАНЕЦ (лат. Manganum), Mn, — хим. элемент побочной подгруппы VII группы периодич. системы элементов, ат. номер 25, ат. масса 54,9380. В природе представлен одним стабильным изотопом  $^{55}\text{Mn}$ . Конфигурация внеш. электронных оболочек  $3s^2 3p^6 3d^5 4s^2$ . Энергии последоват. ионизации равны соответственно 7,435; 15,640; 33,70; 51,2; 72,4 эВ. Металлич. радиус 0,130 нм, радиус ионы  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{7+}$  равны соответственно 0,091, 0,052 и 0,046 нм. Значение электроотрицательности 1,60.

Свободный Mn — серебристо-белый хрупкий металл. Известны 4 модификации Mn. До темп-ры 700 °C устойчив  $\alpha$ -Mn с кубич. объёмноцентриров. решёткой, параметр  $a = 0,89119$  нм, 58 атомов в элементарной ячейке; при темп-рах 700—1079 °C существует  $\beta$ -Mn с кубич. объёмноцентриров. решёткой, параметр  $a = 0,63145$  нм, 20 атомов в элементарной ячейке; при 1079—1143 °C существует  $\gamma$ -Mn с гранецентриров. тетрагональной решёткой; выше 1143 °C устойчив  $\delta$ -Mn с кубич. объёмноцентриров. решёткой (по др. данным, темп-ры переходов:  $\alpha \rightarrow \beta$  727 °C,  $\beta \rightarrow \gamma$  1095 °C,  $\gamma \rightarrow \delta$  1133 °C,  $t_{\text{пл}} = 1245$  °C,  $t_{\text{пл}} 1962 \sim 2119$  °C (по разным данным)). Плотность  $\alpha$ -Mn 7,46 кг/дм<sup>3</sup> (20 °C); теплота плавления 12,56 кДж/моль, теплота испарения 226,9 кДж/моль; уд. теплоёмкость (25 °C) 26,29 кДж/(моль·K); термич. коэф. линейного расширения  $2,23 \cdot 10^{-5}$  град<sup>-1</sup> (20 °C), теплопроводность 0,836 Вт/(м·K) (10 °C); уд. электрич. сопротивление  $1,5 \sim 2,6$  МкОм·м; термич. коэф. электрич. сопротивления  $1,7 \cdot 10^{-3}$  K<sup>-1</sup>. М. парамагнетик,  $\chi = 9,63 \cdot 10^{-6}$  (при 293 K). М. в  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификации при 20 °C хрупок и твёрд, а  $\gamma$ -Mn пластичен, но при охлаждении деформация приводит к объёмным напряжениям в металле. В металле, M. заметно растворим водород.

В хим. соединениях проявляет степени окисления от +2 до +7 (наиб. характерны +2, +4, +7). Соединения, отвечающие степени окисления +1, — сильные окислители (напр., перманганат калия  $\text{KMnO}_4$ ). Мн. соединения токсичны.

Осн. область применения М. — чёрная металлургия. М. входит в состав всех чугунов и сталей. Его вводят также в состав разл. бронз, мanganина и др. нежелезных сплавов. Соединения М. и кремния  $\text{Mn}_2\text{Si}$  и  $\text{MnSi}$  — высокотемпературные полупроводниковые материалы, последний используется в термоэлектрич. Мн. сплавы М. ферромагнитны. Оксид марганца (4+)  $\text{MnO}_2$  (пирролит) используют в произ-ве стекла и в качестве

деполяризатора в сухих элементах. Входит в состав разл. красителей. Из искусственно полученных радиоизотопов М. применено находят  $^{56}\text{Mn}$  ( $\beta^-$ -радиоактивен,  $T_{1/2}$  2,5785 года) и  $^{54}\text{Mn}$  (электронный захват,  $T_{1/2}$  312,5 сут).

С. С. Вердосов. **МАРКОВСКИЕ СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ** — процесс с баз вероятностного последствия, статич. свойства к-рых в последующие моменты времени зависят только от значений процессов в данный момент и не зависят от их предистории. М.с.п. — удобная матем. идеализация разл. случайных процессов, встречающихся в физике. К ним относятся процессы типа броуновского движения, равновесные и неравновесные флуктуации параметров макроскопич. систем, сравнительно медленные изменения амплитуды и фазы сигналов автогенераторов под действием быстро меняющихся естеств. шумов и т. д. Эффективность марковского процесса приближения при рассмотрении реальных случайных процессов обусловлена существованием развитого матем. аппарата для анализа статич. свойств М.с.п.

Тип М.с.п.  $X(t)$  определяется тем, к какому множеству принадлежит аргумент  $t$  и возможные значения процесса  $x$ . Если  $t$  и  $x$  принимают дискретные значения,  $X(t)$  представляет собой марковскую цепь. М.с.п. с непрерывным временем, принимающие значения из дискретного множества  $\{x_k\}$ , наз. дискретнозначными марковским процессом. К ним относятся, в частности, телеграфный процесс с двумя значениями  $\pm 1$ , смена к-рых происходит в случайные моменты времени.

Рассмотрим непрерывнозначный М.с.п. с непрерывным временем. Пусть в моменты  $t_1 > t_2 > \dots > t_n$  известны значения процесса  $X(t_i) = x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  и  $W(x, t | x_1, t_1; \dots; x_n, t_n)$  — условная плотность вероятности значений процесса в момент  $t > t_1$ , тогда справедливо равенство

$$W(x, t | x_1, t_1; \dots; x_n, t_n) = W(x, t | x_1, t_1),$$

выражающее отсутствие последствия. Условную плотность вероятности  $W(x, t | y, s)$ ,  $t > s$ , полностью определяющую [вместе с безусловной плотностью вероятности  $W(y, s)$ ] все статич. свойства М.с.п., наз. плотностью вероятности переходов. Она удовлетворяет интегральному уравнению Смолуховского

$$W(x_1, t_1 | x_2, t_2) = \int W(x_1, t_1 | x_2, t_2) W(x_2, t_2 | x_3, t_3) dx_2,$$

$$t_1 > t_2 > t_3,$$

от к-рого можно перейти к кинетич. уравн-ю

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x^n} (K_n W).$$

Здесь

$$K_n(x, t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \tau^{-1} \int (z - x)^n W(x, t + \tau | x, t) dz =$$

кинетич. коэф., описывающие локальные свойства М.с.п. в момент  $t$  в точке  $x$ . Для разрывных М.с.п., реализации к-рых скачком меняют значения в случайные моменты времени, кинетич. уравн. эквивалентны интегро-дифференц. Колмогорова — Феллера уравнениям.

М.с.п., реализации к-рых с вероятностью 1 непрерывно во времени, наз. непрерывными или диффузными процессами. Для них отличны от нуля только два кинетич. коэф.: коэф. сноса  $A(x, t) = K_1(x, t)$  и коэф. диффузии и  $B(x, t) = K_2(x, t)$ . При этом кинетич. уравн. переходит в Фоккера — Планка уравнение (см. также Колмогорова уравнения):

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (AW) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} (BW).$$

Если  $K_n = K_n(t)$  или  $K_n = K_n(x)$ , то М.с.п. наз. о д н о р о д н ы м в пространстве или во времени. В последнем случае плотность вероятности переходов задается лишь от разности времён:  $W(x,t|y,s) = W(x,t-s|y)$ . Простейшим однородным в пространстве и во времени непрерывным М. с. п. является *винеровский случайный процесс*, для  $k$ -рого  $K_1 = 0$ ,  $K_2 = 1$ . Он описывает, напр., свободную диффузию частиц в среде с пост. темп.-рой. Простейшим однородным во времени процессом является процесс Орнштейна — Уленбека, для  $k$ -рого  $K_1 = -hx$ ,  $K_2 = 1$ . У-р-ние Фоккера — Планка в этом случае имеет вид

$$\frac{\partial W}{\partial t} = h \frac{\partial}{\partial x}(xW) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Статистич. характеристики М. с. п. находят, исследуя решения кинетич. у-р-ний с теми или иными начальными и граничными условиями. Так, плотность вероятности переходов процесса Орнштейна — Уленбека, удовлетворяющая у-р-нию (1) с начальным условием  $W(x,0|y) = \delta(x-y)$  равна

$$W(x,t|y) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{h(x-ye^{-ht})^2}{2}\right] / \sqrt{\pi}, \\ \tilde{h} = h/(1 - e^{-2ht}).$$

Для однородных во времени процессов может существовать стационарная плотность вероятности

$$W_{ст}(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} W(x,t|y),$$

удовлетворяющая, в случае диффузионного процесса, обыкновенному дифференц. у-р-нию

$$\frac{d}{dx}(A V_{ст}) = \frac{1}{2} \frac{d^2}{dx^2}(B W_{ст}).$$

При анализе М. с. п., реализации  $k$ -рых обрываются или отражаются на заданных границах, кинетич. у-р-ния дополняют граничными условиями.

Реализации М. с. п. с непрерывным временем удовлетворяют дифференц. *стохастическим уравнениям*. Напр., реализации диффузионного процесса  $X(t)$  удовлетворяют у-р-нию

$$dX/dt = a(X(t),t) + b(X(t),t)\xi(t), \\ X(x) = y, \quad (2)$$

здесь  $a(x,t)$  и  $b(x,t)$  — детерминиров. ф-ции, а  $\xi(t)$  — белый шум, для  $k$ -рого

$$\langle \xi \rangle = 0, \quad \langle \xi(t)\xi(t+\tau) \rangle = D\delta(\tau).$$

Кинетич. коэф. диффузионного процесса, описываемого у-р-нием (2), равны:

$$A = -a + (D/4)\partial b^2/\partial x, \quad B = Db.$$

Лит.: Стратонович Р. Л., Избранные вопросы теории флуктуаций в равновесии, М., 1961; Тихонов В. В., Миронов М. А., Марковские процессы, М., 1977; Справочник по теории вероятностей и математической статистике, 2 изд., М., 1985. А. И. Малахов, А. И. Саичев.

**МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА ПРИБЛИЖЕНИЕ** — приближённый метод решения дифференц. у-р-ний, содержащих случайные параметры; основан на малости отношения времени корреляции воздействий  $\tau_0$  ко времени корреляции отклика  $\tau_1$ . Формально соответствует пределу  $\tau_0/\tau_1 \rightarrow 0$ . Непосредственно применим лишь к причисленным задачам, в  $k$ -рых значения динамич. переменных в нек-рый момент времени функционально не зависят от последующих по времени значений случайных параметров. В физ. задачах М. п. является гл. членом разложения по малому параметру  $\tau_0/\tau_1$  и, в отличие от методов теории возмущений, допускает описание сильных флуктуаций, возникающих в физ. системе под влиянием случайных воздействий.

Пусть поведение динамической системы описывается обыкновенными дифференц. у-р-ниями:

$$\frac{d\xi_i(t)}{dt} = v_i(\xi_1, \dots, \xi_n; t) + \Phi_i(\xi_1, \dots, \xi_n; t), \quad (1)$$

$$\xi_i(t_0) = a_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Здесь  $v_i(x_1, \dots, x_n; t)$  — детерминиров. ф-ции своих аргументов, а  $\Phi_i(x_1, \dots, x_n; t)$  — случайная ф-ция ( $n+1$ ) переменной, обладающая след. свойствами (...): означает статистич. усреднение,  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ :

$$\langle \Phi_i(x; t) \rangle = 0, \quad (2)$$

$$\langle \Phi_i(x; t) \Phi_j(x'; t') \rangle = B_{ik}(x, x'; t, t'), \quad (3)$$

$$\Phi_i(x; t) \text{ — гауссовы случайные функции.} \quad (4)$$

В у-р-нии (1) случайна как сама ф-ция  $\Phi_i(x; t)$  при детерминиров. аргументах, так и ф-ции  $\xi_i(t)$ , входящие в аргументы  $\Phi_i$ :  $\Phi_i(\xi; t)$ . Условия (2) — (4) накладываются на случайные ф-ции  $\Phi_i(x; t)$  при детерминиров. аргументах.

Если реальную корреляц. ф-цию (3) заменить ф-цией вида

$$B_{ik}(x, x'; t, t') \rightarrow B_{ik}^{ф\phi}(x, x'; t, t') = 2F_{ik}(x, x'; t)(t-t')$$

и считать, что входящие в (1) гауссовы случайные ф-ции характеризуются корреляц. ф-цией  $B_{ik}^{ф\phi}$ , то это соответствует замене истинного времени корреляции  $\tau_0$  нулем и эквивалентно переходу к М. п. п. При этом в (1) возникают два стремящихся к нулю временных масштаба: один — при вычислении производной  $d\xi_i/dt = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [\xi_i(t+\Delta t) - \xi_i(t)]/\Delta t$ , другой — при стремлении к нулю  $\tau_0$ . Ниже предельный переход  $\tau_0 \rightarrow 0$  совершают после выполнения перехода  $\Delta t \rightarrow 0$ , т. е. предполагают, что  $\Delta t/\tau_0 \rightarrow 0$ . Ф-ции  $F_{ik}$  находят из условия

$$F_{ik}(x, x'; t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} B_{ik}(x, x'; t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}) d\tau.$$

При сделанных предположениях плотность вероятностей

$$W(x,t) \approx \langle \delta(\xi_1(t) - x_1) \dots \delta(\xi_n(t) - x_n) \rangle$$

решения системы (1) удовлетворяет *Эйнштейна — Фоккера — Планка уравнению*

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [A_i(x,t)W] = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [F_{ij}(x, x'; t)W], \quad (5)$$

где  $A_i(x,t) = v_i(x,t) + \left[ \frac{\partial F_{ik}(x, x'; t)}{\partial x_k} \right]_{x'=x}$ ,

по повторяющимся индексам производится суммирование. Совместная плотность вероятностей для величин  $\xi_i(t_1), \dots, \xi_i(t_n)$  при  $t_n \geq t_{n-1} \geq \dots \geq t_1$  в этом случае распадается на произведение

$$W(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_1, t_1) = \\ = P(x_n, t_n | x_{n-1}, t_{n-1}) \cdot P(x_{n-1}, t_{n-1} | x_{n-2}, t_{n-2}) \times \dots \\ \times \dots \cdot P(x_2, t_2 | x_1, t_1) W(x_1, t_1),$$

а ф-ция  $P(x, t; x_0, t_0)$  (переходная вероятность) удовлетворяет по переменным  $x, t$  у-р-нию (5) с нач. условием  $P(x, t_0 | x_0, t_0) = \delta(x - x_0)$ . Т. о., случайный процесс  $\xi(t)$  является марковским.

В реальных физ. задачах время корреляции флуктуаций всегда конечно и вопрос о пригодности М. п. п. сводится к учёту конечности малого параметра  $\tau_0/\tau_1$ . Одно из условий применимости М. п. п. всегда имеет вид  $t \gg \tau_0$ , но обычно возникает и др. условия.

М. п. п. применимо и к причисленным задачам, описываемым у-р-ниями с частными производными, однако здесь уже нет такой универсальной формулировки, как для обыкновенных дифференц. у-р-ний.

Задачи, описываемые дифференц. у-р-ниями с двухточечными граничными условиями (напр., в задаче о распространении волны одно из граничных условий

ставится в точку возбуждения волны, а второе описывает её отражение от нагрукы (в конце), непосредственно нельзя описать. М. п. п. Однако в ряде случаев такие задачи можно свести к вспомогат. задачам Коши (методом инвариантного погружения или др. способами), после чего к ним применимо М. п. п.

Лит.: Клячкин В. И., Татарский В. И., Приближенные диффузионные случайного процесса в некоторых нестационарных статистических задачах физики, «УФН», 1973, т. 110, с. 495; Введение в статистическую радиофизику, ч. 1 — Рытов С. М., Слюняев процесс, ч. 2 — Рытов С. М., Крайнов Ю. А., Татарский В. И., Случайные поля, М., 1976—78; Клячкин В. И., Стохастические уравнения и волны в случайно нелинейных средах, М., 1980, гл. 2; В. И. Татарский.

**МАРС** — четвёртая по порядку от Солнца большая планета Солнечной системы. Ср. расстояние от Солнца 1,524 а. е. (227,9 млн. км). Эксцентриситет орбиты 0,0934, наклон плоскости орбиты к эклиптике  $0^{\circ} 51'$ ; экватор М. наклонён к плоскости его орбиты на  $25,2^{\circ}$ , что вызывает сезонные изменения на планете. Период обращения М. вокруг Солнца 686,98 сут (сидерический период обращения). Ср. скорость движения на орбите 24,43 км/с. Экваториальный радиус 3394 км, полярный — 3376,4 км, динамич. полярное сжатие  $\approx 1/200$ . Найдена значит. асимметрия М. вдоль полярной оси: уровень поверхности почти во всём южном полушарии лежит на 3—4 км выше, чем в северном. Период вращения М. вокруг своей оси 24 ч 37 мин 22,58 с. Расстояние в перигелии 207 млн. км, в афелии 249 млн. км. Кол-во солнечной энергии, получаемой М. при наб. и нам. расстояниях от Солнца, различается на 20—30%. Масса М.  $6,44 \cdot 10^{23}$  кг (0,108 земной), ср. плотность  $3950 \text{ кг/м}^3$ ; ускорение свободного падения на экваторе  $3,76 \text{ м/с}^2$ ; первая космическая скорость 3,6 км/с, вторая — 5 км/с. Барометрич. сферич. альbedo  $0,20 \pm 0,05$ ; ср. эффективная темп-ра поверхности 246 К.

Благоприятные условия для исследования М. наземными и космич. средствами воинакют на время противостояний, происходящих с интервалом 779,94 сут (ср. синодич. период обращения). Расстояние между М. и Землей в противостояниях не одинаково и меняются циклами продолжительностью в 15—17 лет. Противостояния при прохождении М. вблизи перигелия наиб. благоприятны, т. к. в этот период расстояния между планетами становятся наименьшими,  $\approx 36$  млн. км; они происходят один раз за цикл и наз. великими противостояниями.

При наблюдениях с Земли на М. выделяются светлые области красно-оранжевого цвета, занимающие ок. 75% его поверхности, к-рые исторически получали назв. «материка», и тёмные области серо-зелёного оттенка — «моря». Определ. зависимости в относительном высотном расположении «материков» и «морей» не выявлено. Перепады высот в планетарном масштабе, впервые обнаруженные радиолокац. исследованиями привокторальной области М., достигают 14—18 км.

Наиб. прогресс в исследованиях М. достигнут благодаря полётам космич. аппаратов (сов. «Марс-1»—7, «Фобос-2», амер. «Маринер-4», «6», «7», «9», «Викинг-1», «2»). Отсытая поверхность М. с разрежением менее 1 мм. Сильно кратеровые участки поверхности М. с диаметрами кратеров от неск. км до сотен км характерны в осн. для средние и высокоширотных районов южного полушария. Сглаженность кратеров больше, чем на Луне и Меркурии, но значительно меньше, чем на Венере. Крупным кратером присвоены имена советских и зарубежных учёных, кратером меньшего размера дано наименование небольшого насел. пунктов на Земле.

Очевидные следы вулканизма и тектонич. деятельности на планете служат доказательством геологич. активности, завершившейся, видимо, ок. 1 млрд. лет назад. Громадные потухшие цитовые вулканы диаметрами в основании до 600 км и выс. до 27 км сосредоточены в возвышенной области Фарсида в северном полушарии. Об интенсивной тектонич. деятельности

свидетельствуют многочисленные разломы и сбросы марсианской коры — грабени, угёсы, обширные ущелья с системой ветвящихся каньонов, достигающие неск. км в глубину, десятков км в ширину, сотен км в длину.

В формировании совр. облика М. важную роль сыграли также интенсивная ветровая и, по-видимому, водная эрозия, осадконакопление и глинизация процессов. Белые полярные шапки образуются вблизи полюсов в период с начала марсианской осени до конца весны в соответствующем полушарии за счёт конденсации углекислого газа, а их исчезающая за лето часть (значительная у северной полярной шапки) состоит в осн. из обычного льда, возможно, с примесью клатратов  $\text{CO}_2$ . С динамикой сезонных изменений размеров шапок связаны изменения отражат. свойств поверхности М., включая известную «волну потемнения», распространяющуюся в целом от полярных шапок к экватору в весенний период. Тёмные области систематически на неск. градусов теплее светлых. «Волна потемнения» и периодич. изменение очертаний светлых и тёмных областей являются следствием перераспределения пыле-песчаного тонкодисперсного материала вдоль поверхности при перестройке циркуляц. процессов в атмосфере и смене направлений местных ветров. Этот материал, выдуваемый из кратеров, образует характерные шлейфы позади их кромок; на поверхности и внутри кратеров часто образуются песчаные дюны. Данные о тепловой инерции поверхностных слоёв М. согласуются с моделью раздробленного грунта со ср. размерами частиц  $0,01$ — $0,05$  см в слое проникновения теплового волна (5—7 см) вследствие суточного и годового хода темп-ры. По результатам определения диэлектрич. проницаемости материала поверхности на глубине в неск. десятков см ср. значение плотности  $1500$ — $2000 \text{ кг/м}^3$ . Из анализа углубления опор космич. аппарата ср. плотности  $1200$ — $1800 \text{ кг/м}^3$ . Значит, суточно-сезонные вариации темп-ры, достигающие св.  $100 \text{ K}$ , в πράктич. отсутствие колебаний темп-ры вне на глубине в неск. десятков см свидетельствуют о крайне низкой теплопроводности марсианского грунта ( $\approx 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ кал} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Согласно модели, отвечающей данным размерам содержания хим. элементов в грунте, осн. соединениями являются (% по массе):  $\text{SiO}_2$  — 45;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 18;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 5;  $\text{MgO}$  — 8;  $\text{CaO}$  — 5;  $\text{SO}_2$  — 8; содержание щелочных металлов очень низкое.

Атмосфера М. разрежена, давление у поверхности в зависимости от рельефа изменяется от 0,18 до 1 кПа. За ср. давление, примерно соответствующее давлению на поверхности ср. уровня (от этого уровня отсчитывают высоту гор и глубину впадин), принято давление в тройной точке на фазовой диаграмме воды (0,611 кПа). Состав атмосферы (% по объёму):  $\text{CO}_2$  — 95;  $\text{N}_2$  — 2,7;  $\text{Ar}$  — 1,6;  $\text{O}_2$  — 0,15. Содержание водяного пара очень низкое и испытывает заметные суточно-сезонные колебания: от менее 1 мкм осаджённой воды в зимнем полушарии до почти 100 мкм осаджённой воды над полярной шапкой летом. Обнаружены отд. районы повышенной влажности в ср. широтах, а также небольшие кол-во озона, практически не влияющие на ослабление интенсивной солнечной УФ-радиации, проникающей сквозь разреженную атмосферу М. до поверхности. Ср. темп-ра у поверхности близка к эффективной, двум темп-ра поверхности выше, ночью ниже, чем темп-ра атмосферы. Суточно-сезонные вариации темп-ры составляют  $100$ — $150 \text{ K}$ , миним. темп-ра на полярных шапках зимой опускается ниже темп-ры конденсации  $\text{CO}_2$  ( $148 \text{ K}$  при 0,61 кПа). Из-за больших температурных контрастов на поверхности и малой плотности атмосфера М. очень динамична, скорости ветра достигают неск. десятков м/с, а во время пылевых бурь  $80$ — $100 \text{ м/с}$ . Периоды глобальных пылевых бурь обычно совпадают с противостояниями М. Облака пыли поднимаются до высот  $\approx 10 \text{ км}$ , почти полностью сглаживая температурные контрасты на поверхности. Распределение

темпы в атмосфере по вертикали стремится к изотермическому, а темпы на поверхности падают на 20—30 К. Число пылевых частиц в атмосфере во время бури достигает  $10^{12}$ — $10^{13}$  в  $1 \text{ м}^3$  ( $\sim 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>), ср. размер частиц 1—3 мкм. В спокойной атмосфере также присутствует пыль со ср. размерами частиц 0,05—0,1 мкм. В отличие от пылевых (желтых) облаков, белые и синие облака в атмосфере имеют конденсат, природу — в тропосфере на  $\text{H}_2\text{O}$ , в стратосфере преим. из  $\text{CO}_2$ . (Подразделение облаков по цветовому признаку обусловлено соответствующим светофильтром, через к-рый они наблюдаются.) В верх. атмосфере до 150 км преобладает  $\text{CO}_2$ , выше —  $\text{O}$  и  $\text{CO}$ , начиная с высоты ок. 400 км. — Не и  $\text{H}_2$ . Ионосфера М. менее плотная, чем земная, и более поджата к планете: дневной максимум на выс. 135—140 км имеет электронную концентрацию  $N_e = (1,5-2) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ , второй, менее чёткий максимум находится на выс. ок. 110 км с  $N_e = 7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . На ночной стороне максимум  $N_e$  опускается до высот 100—110 км ( $N_e$  в нём не превышает  $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ ). Осн. компонентом марсианской ионосферы является ион  $\text{O}^+$ .

Обнаружение на поверхности длинных, ветвищихся долин типа высохших речных русел, выглаженных долин и островов свидетельствует о водной эрозии в определённые (равнинные) периоды марсианской истории. Газовый и изотопный анализ атмосферы, включая составление относ. содержания инертных газов с их содержанием на Земле и в метеоритах, дают основание считать, что когда-то Марс обладал существенно (примерно в 20 раз) более плотной атмосферой и на его поверхности могла быть вода в жидком состоянии. Общее же содержание в совр. эпоху в виде подповерхностного льда и полярных шапок оценивается эфф. толщиной равномерно разлитого по поверхности слоя  $\approx 30$  м (ср. глубина Мирового океана на Земле  $\approx 4$  км).

Относительно проявлений биол. активности или возможных следов биосферы на М. ничего определённого пока сказать нельзя. Эксперименты на космич. аппарате «Вангег» дали противоречивые результаты. Возможно, что осн. препятствием к обнаружению к.-л. форм жизни являлся недостаточная чувствительность (для неэффективности) использованных методов в условиях сильноокислительной среды в поверхностном слое планеты.

У М. предполагалось магн. поле с напряжённостью на экваторе, приведённой к поверхности,  $\approx 51,8 \text{ мА/м}$  (в  $\sim 10^3$  раз слабее земного), однако вывод о принадлежности его самой планете подвергнут сомнению измерениями КА «Фобос-2».

У М. есть два спутника: Фобос (Страх) и Деймос (Ужас). Фобос обращается вокруг М. с периодом 7 ч 39 мин (сидерич. период) на ср. расстоянии 3350 км, т. е. обгоняет планету в её суточном вращении. Сидерич. период Деймоса, обращающегося на ср. расстоянии 23 500 км, — 30 ч 17 мин. Оба спутника всегда обращены к М. одной стороной и имеют неправильную, астероидоподобную форму с макс. размерами соответственно  $21 \times 26$  и  $12 \times 13$  км. Поверхности их покрыты многочисл. кратерами (плотность кратеров в 100 раз больше, чем на М.). Возможно, они сохранились со времени аккреции планеты или (что более вероятно) захвачены позднее её гравитат. полем.

Лит.: Марс в В. И. Физика планеты Марс. М., 1978; Марс в М. Я., Планеты Солнечной системы, 2 вып., М., 1986. М. Я. Марс.

**МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ** [от имени А. Мартенса (A. Martens)] — один из видов структурных превращений (см. *Полиморфизм*), при к-ром изменение взаимного расположения составляющих кристалл атомов (молекул) происходит в результате отнес. смещений соседних атомов на расстояния, малые по сравнению с межатомным расстоянием. Перестройка кристаллич. решётки обычно сводится к деформации её элементарной ячейки, и конечная фаза М. п. может рассматриваться как однородно деформированная ис-

ходная фаза. Величина деформации мала ( $\sim 10^{-2}$ — $10^{-3}$ ) и соответственно мал (по сравнению с энергией связи частиц в кристалле) энергетич. барьер, препятствующий однородному переходу исходной фазы в конечную.

М. п. развивается путём образования и роста областей более стабильной фазы в исходной метастабильной. Необходимым условием М. п. является сохранение упорядоченного контакта между сосуществующими фазами. Упорядоченное строение межфазных границ при малости барьера для однородного фазового перехода обеспечивает их малую энергию и высокую подвижность (см. *Межфазные границы*). В соответствии с малой величиной межфазной поверхностной энергии избыточная энергия, необходимая для зарождения кристаллов новой фазы, мала и при нек-ром отклонении от равновесия фаз становится сопоставимой с энергией дефектов, присутствующих в исходной фазе. Поэтому зарождение мартенситной фазы происходит с большой скоростью и может не требовать тепловых флуктуаций (ветерич. М. п.).

Вследствие воздействия образовавшейся фазы на прилегающие объёмы исходной фазы барьер для перемещения межфазной границы существенно меньше, чем энергетич. барьер для однородного перехода. При небольших отклонениях от равновесия фаз барьер для межфазной границы исчезает. При этом рост мартенситной фазы лимитируется только скоростью отвода энергии или взаимодействием границы с дефектами и происходит со скоростью порядка звуковой. Т. к. безбарьерное развитие М. п. не связано с тепловой активацией, то М. п. в низкотемпературную фазу всегда может быть «заморожено» быстрым охлаждением и может протекать при  $T \rightarrow 0\text{K}$ . При достаточно большом отклонении от равновесия фаз возможна потеря устойчивости исходной метастабильной фазы; барьер для однородного фазового перехода исчезает. Соответствующее падение сопротивления упругому искажению, переводящему кристалл в новую фазу, наблюдалось при охлаждении в нек-рых сплавах (Cu — Ti, V<sub>3</sub> — Si).

Сущность. роль при М. п. играют внутр. напряжения, возникающие из-за упругого «приспособления» кристаллич. решётки, сопрягающихся фаз. Упругие поля напряжений приводят к смещению равновесия взаимодействующих фаз относительно положения истинного термодинамич. равновесия для изолированных, несканькённых фаз. Поэтому темп-ра начала М. п. может значительно отличаться от темп-ры истинного равновесия.

Стремление к минимуму упругой энергии определяет внутр. структуру и взаимное расположение мартенситных кристаллов. Новая фаза образуется в форме тонких пластинок, определ. образом ориентированных относительно кристаллографич. осей. Пластинки, как правило, не являются монокристаллами, а представляют собой пакеты плоскостараллельных доменов — областей новой фазы, различающихся ориентацией кристаллич. решётки (между собой домены находятся в двойниковом отношении; см. *Домены упругие, Двойникование*). Интерференция полей напряжений от раал. доменов приводит к их частичному уничтожению. Дальнейшее уменьшение упругих полей достигается за счёт формирования ансамблей из закономерно расположенных пластин. Т. о. в результате М. п. возникает поликристаллич. фаза со своеобразным иерархич. порядком (ансамбли — пластины — домены) в расположении структурных составляющих (см. *Гетерофазная структура*). Деформирование материала с такой структурой происходит в осн. за счёт смещения доменных границ («сверхупругость»). При нагреве происходит обратное превращение мартенситной фазы в исходную, и тело восстанавливает первонач. форму, к-ую оно имело до М. п. (память формы).

Рост внутр. напряжений в процессе М. п. в определ. условиях приводит к установлению двухфазного термомупругого равновесия, к-рое обратно смещается при

изменении внеш. условий: под действием механич. нагрузок или при изменении темп-ры размеры отд. кристаллов и их число изменяются.

Представленная картина, к-рой достаточно полно отвечают М. п. в сплавах цветных металлов, обычно искажена процессами пластич. релаксации — рождением и перемещением *дислокаций*. Релаксация внутр. напряжений делает М. п. существенно необратимым: между прямым и обратным превращением возникает *гистерезис*. «Оседание» дислокаций на межфазных границах уменьшает подвижность границ и увеличивает их энергию; соответственно растёт барьер для зарождения новой фазы. Чем больше степень релаксации, тем при меньших отклонениях от точки истинного равновесия фаз может проходить М. п., во тем меньше его скорость и менее отчётливо проявляется характер продуктов превращения. В одном и том же материале в зависимости от степени отклонения от точки истинного равновесия фаз и скорости релаксации наблюдаются разл. варианты превращения (быстрые итермические М. п., изотермические М. п.; нормальные, подобные *кристаллизации*). Поскольку сопротивление деформации уменьшается с повышением  $T$ , характерные особенности М. п. при высоких  $T$  проявляются слабее, чем при низких.

М. п. обнаружены во мн. кристаллич. материалах: в чистых металлах (Fe, Ti, U, Na, Zr, Ce, Tl и др.), сплавах, ионных ковалентных и молекулярных кристаллах. Наиб. полно изучены М. п. в *сплавах* на основе Fe, в частности в связи с изучением закалки стали. Возникающая при закалке стали фаза — *м а р т е н с и т* дала назв. всему классу превращений. Важные практич. применения имеет также изменение формы при М. п.

В сочетании с диффузионным перераспределением компонентов и изменением атомного порядка М. п. составляют основу многочисленных структурных превращений, благодаря к-рым с помощью термич. и механич. обработки кристаллич. материалов осуществляется направленное изменение их свойств.

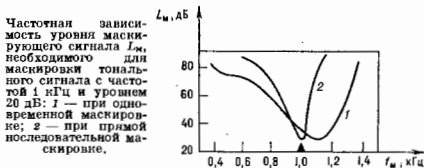
Родственны М. п. сегнетоэлектрич. переходы (см. *Сегнетоэластики*), для к-рых параметром фазового перехода также служит деформация. Однако в отличие от М. п., являющихся переходами 1-го рода, они являются фазовыми переходами 2-го рода.

**Лит.**: Несовершенство кристаллического строения и маргенистические превращения. [Сб. ст.], М., 1972; Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энгельс Р. И., Превращения в железе и стали, М., 1971; В а р и а н т о в Х., Д и г е л ь Л., Маргенистические превращения в сплавах на основе меди, серебра и золота, пер. с англ., М., 1980. А. Л. Ройтбурд.

**МАСКИРОВКА ЗВУКА** — явление, заключающееся в ухудшении слышимости одного звука (сигнала) в присутствии др. звуков (помех). Обычно ухудшение слышимости выражается в повышении порога обнаружения сигнала, и М. з. можно оценивать количественно числом дБ, на к-рое повышается порог слышимости в присутствии помехи (порог маскировки). Различают одновременную, прямую последовательную и обратную М. з. В первом случае тестовый сигнал и помеха (маскер) звучат одновременно, во втором — сигнал следует за маскером, в третьем — сигнал предшествует маскеру. Обратная маскировка проявляется только для коротких сигналов.

Если сигнал и помеха широкополосны, то величина одновременно М. з. в большом динамич. диапазоне пропорциональна уровню интенсивности помехи. Если сигнал и маскер — тоны одинаковой частоты, то М. з. растёт медленнее уровня маскера. При различии спектрального состава сигнала и помехи М. з. определяется гл. обр. составляющими помехи, близкими по спектру к сигналу. Для выявления частотной избирательности слуха в качестве сигнала и маскера используют чистые тоны или очень узкополосные шумы. Зависимость от частоты уровня маскера, необходимого для маскировки слабого сигнала фиксируют частоты и уровни, характе-

ризуют частотную настройку слуховой системы в области частоты сигнала (рис.). В режиме прямой последоват. маскировки частотная избирательность повышается, что объясняется проявлением медленнейших свойств улитки уха.



При одноврем. маскировке тонального сигнала шумовым, спектр к-рого ограничен полосой с центр. частотой, соответствующей сигналу, распределение спектра маскера при постоянной интегральной энергии до нек-рого значения ширины полосы не влияет на величину М. з. Распределение же вне этой полосы, называемой критической, приводит к снижению М. з.

Важными особенностями обладает М. з. при бинауральном восприятии звука. Когда сигнал имеет частоту ниже 2 кГц или когда при более высокой частоте он быстро меняется по амплитуде, М. з. зависит от интерурального (междупушного) соотношения фаз несущей (или соответственно огибающей) сигнала и маскера. При одинаковом интеруральном сдвиге фаз сигнала и маскера М. з. максимальна, при различии интеруральных сдвигов фаз на 180° М. з. обычно минимальна. Этот эффект, во-видимому, является определяющим для явления, называемого феноменом «коктель-парты» и заключающегося в способности человека следить за сигналом, поступающим от одного источника (собеседника), игнорируя помехи с подобными спектрально-временными характеристиками (др. голоса и т. п.).

**Лит.**: В я к е р Э., Ф е л ь д к е л л е р Р., У о н к а н приемы информации, пер. с нем., 2 изд., М., 1971; Г е л ь в а н д С. А., Слух. Введение в психологию, физиологическую акустику, пер. с англ., М., 1984. Н. Г. Выходко.

**МАССА** — фундам. физ. величина, определяющая инерционные и гравитационные свойства тел — от макроскопич. объектов до атомов и элементарных частиц — в релятивистском приближении, когда их скорости пренебрежимо малы по сравнению со скоростью света  $c$ . В этом приближении М. тела служит мерой содержания в теле вещества и имеют место законы сохранения в аддитивности М.: масса изолиров. систем тел не меняется со временем и равна сумме М. тел, составляющих эту систему. Нерелятивистское приближение является предельным случаем *относительности теории*, рассматривающей движение с любыми скоростями вплоть до скорости света.

С точки зрения теории относительности М.  $m$  тела характеризует его энергию покоя  $\epsilon_0$ , согласно соотношению Эйнштейна:

$$\epsilon_0 = mc^2. \quad (1)$$

В теории относительности, как и в нерелятивистской теории, М. изолиров. системы тел со временем не меняется, однако она не равна сумме М. этих тел.

Инерционные (или инерциальные, инертные) свойства М. в релятивистской (позитоновой) механике определяются соотношениями:

$$p = mv, \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = F \quad (3)$$

и вытекающим из них соотношением

$$F = ma, \quad (4)$$

где  $p$  — импульс тела,  $F$  — сила,  $a$  — ускорение. М. входит также в ф-лу кинетич. энергии тела  $T$ :

$$T = \frac{p^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}. \quad (5)$$

В ньютоновой теории гравитации М. служит источником силы всемирного тяготения, притягивающей все тела друг к другу. Сила  $F_g$ , с к-рой тело с массой  $m_1$  притягивает тело с массой  $m_2$ , определяется законом тяготения Ньютона:

$$F_g = -\frac{Gm_1m_2}{r^2}, \quad (6)$$

где  $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$  Н·м<sup>2</sup>·кг<sup>-2</sup> =  $6,7 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>·кг<sup>-1</sup>·с<sup>-2</sup> — гравитационная постоянная, а  $r$  — радиус-вектор, направленный от первого тела ко второму. Из ф-л (4) и (6) следует, что ускорение тела, свободно падающего в гравит. поле, не зависит ни от его М., ни от свойств вещества, из к-рого тело состоит. Эту закономерность, проверенную на опыте в поле Земли с точностью порядка  $10^{-3}$  и в поле Солнца с точностью порядка  $10^{-2}$ , обычно наз. равенством инерции и гравит. (тяготеющей, тяжёлой) М., хотя следует подчеркнуть, что речь идёт не о равенстве двух разных М., а об одной и той же физ. величине — М., определяющей разл. явления.

В спец. теории относительности энергия, импульс, скорость и М. связаны между собой соотношениями, отличающимися от соотношений нерелятивистской механики, но переходящими в последние при  $v/c \ll 1$ . Важную роль в релятивистской механике играет понятие полной энергии  $\mathcal{E}$ , равной для свободного тела сумме его энергии покоя и кинетич. энергии,  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + T$ . По существу всю механику релятивистской свободной частицы описывают два ур-ния:

$$\mathcal{E}^2 - p^2c^2 = m^2c^4, \quad (7)$$

$$p = \mathcal{E}v/c^2. \quad (8)$$

Отметим, что величина  $m$ , входящая в правую часть ур-ния (7), — это та же М., к-рая входит в ур-ния ньютоновой механики. В отличие от энергии и импульса, меняющихся при переходе от одной системы отсчёта к другой, М. остаётся при этом неизменной: она является дорелятивским инвариантом.

Соотношение (3) справедливо и в теории относительности при произвольных значениях  $v/c$ , но соотношения (2) и (4) уже не имеют места. В частности, направление и величина ускорения тела определяются не только силой, но и скоростью, так что при не малых значениях  $v/c$  ввести одну величину, к-рая служила бы мерой инертности тела, в этом случае нельзя.

Не является в релятивистском случае М. и источником гравит. поля, им является тензор энергии-импульса, имеющий в общем случае 10 компонент.

На ур-ий (7) и (8) следует, что если тело имеет нулевую М., то оно движется всегда со скоростью света и не может находиться в покое, и наоборот, если тело движется со скоростью света, его М. должна равняться нулю. В пределе  $v/c \rightarrow 0$  из этих ур-ий следует, что  $\mathcal{E} \rightarrow \mathcal{E}_0 = mc^2$ ,  $p \rightarrow mv$ ,  $T \rightarrow p^2/2m$ , т. е. воспроизводятся соотношения Эйнштейна (1) и нерелятивистские выражения (2) и (5) для импульса и кинетич. энергии.

При произвольных значениях  $v/c$  из ур-ий (7) и (8) для тела с  $m \neq 0$  можно получить

$$\mathcal{E} = mc^2\gamma, \quad p = m\gamma v, \quad (9)$$

где  $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$  — т. н. лоренц-фактор.

В спец. теории относительности имеют место законы сохранения энергии и импульса. В частности, энергия  $\mathcal{E}$  (импульс  $p$ ) системы  $n$  свободных частиц равна сумме их энергий (импульсов)

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i, \quad p = \sum_{i=1}^n p_i. \quad (10)$$

Отсюда и из ф-лы (7) следует, что М. системы не равна сумме М. составляющих её частей. Так, легко проверить, что в простейшем случае двух фотонов с энергией  $\mathcal{E}$  у каждого их суммарная М. равна нулю, если они летят в одну сторону, и  $2\mathcal{E}/c^2$ , если они летят в противоположные стороны. Этот пример иллюстрирует также и то обстоятельство, что в теории относительности М. системы тел уже не является мерой кол-ва вещества.

Единицей М. в системе СГС служат грамма, в СИ — килограмма. М. атомов и молекул обычно измеряется в атомных единицах масс. М. элементарных частиц принято измерять в МэВ/ $c^2$  (или, пользуясь системой единиц, в к-рой  $c = 1$ , — в МэВ). Напр., М. электрона  $m_e = 0,511$  МэВ/ $c^2$ . М. протона  $m_p = 938,3$  МэВ/ $c^2$ . М. самой тяжёлой из открытых элементарных частиц — Z-бозона —  $m_Z \approx 91$  МэВ/ $c^2$ .

Известны многочисленные примеры взаимопревращения энергии покоя в кинетич. энергию и наоборот. Так, на встречных электрон-позитронных пучках при столкновении  $e^+$  и  $e^-$  с энергиями  $\mathcal{E}_\pm = E_{\text{пуч}} = mv_{\text{пуч}}^2/2$  и противоположно направленными импульсами рождается покоящийся Z-бозон. При аннигиляции покоящихся электрона и позитрона все их энергия покоя превращается в кинетич. энергию фотонов. В результате термодерных реакций на Солнце происходит превращение двух электронов и четырёх протонов в ядро гелия и два нейтрино и выделяется кинетич. энергия

$$T = (2m_e + 4m_p - m_{\text{He}} - 2m_{\nu})c^2 = 29,3 \text{ МэВ}.$$

В этом случае в кинетич. энергию переходит примерно 1% суммы М. частиц, вступающих в реакцию. При делении ядра урана  $T \approx 200$  МэВ, что составляет  $\sim 10^{-3}$  М. При горении метана  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  выделяется энергия  $\sim 10^{10}$  М. В процессе фотосинтеза М. возрастает примерно на такую же величину за счёт поглощения растением кинетич. энергии фотонов.

Если частицы не свободны, как, напр., электроны в металле или кварки в нуклоне, они имеют *эффективную массу*. Эфф. М. кварка зависит от расстояния, на к-ром она измеряется: чем меньше расстояние, тем меньше М. кварка. Существует принципиальное различие между М. кварка и М. электрона, т. к. кварк, в отличие от электрона, не может находиться в свободном состоянии.

Природа М. элементарных частиц является одним из гл. вопросов физики. На рубеже 19 и 20 вв. предполагали, что М. может иметь эл.-магн. происхождение. В наст. время известно, что эл.-магн. взаимодействие ответственно лишь за малую долю М. электрона. Известно также, что осн. вклад в М. нуклонов даёт сильное взаимодействие, обусловленное *глюонами*, а не М. входящих в нуклоны кварков. Но не известно, чем обусловлены М. лептонов и кварков. Существует гипотеза, что здесь осн. роль играют фундамент. бозоны с нулевым спином — т. п. хиггсовы бозоны (см. *Хиггса механизм*). Поиск этих частиц — одна из осн. задач физики высоких энергий.

В учебной, научно-популярной и энциклопедической литературе (в частности, в статьях данной энциклопедии, посвящённых релятивистским ускорителям заряж. частиц) ещё широко распространена архаичная терминология, возникшая в нач. 20 в. в процессе создания теории относительности. Исходным пунктом её являются использование ф-лы  $p = mv$  в области не малых значений  $v/c$ , где справедлива ф-ла (8). В результате возникли утверждения, что  $m = \mathcal{E}/c^2$ . М. тела растёт с увеличением его скорости (энергии), фотон обладает М. и имеется полная эквивалентность между М. и энергией:

$$\mathcal{E} = mc^2. \quad (11)$$

Вопреки тому, что писал А. Эйнштейн в статье [1] и книге [2], часто именно эту ф-лу, а не ф-лу (1) называют ф-лой Эйнштейна. Так, определённую М., как



правило, обозначают  $m$  и называют  $M$ , реже — релятивистской  $M$  ( $m_r$ ) или  $M$  движения ( $m_{\text{движ}}$ ). При этом обычно  $M_0$ , о  $k$ -рой говорилось в этой статье, называют  $M_0$  покоя или собственной  $M$  и обозначают  $m_0$ . Одной из осн. ф-л теории относительности объявляется ф-ла

$$m = m_0 \gamma = m_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (12)$$

Всё это приводит к терминологич. путанице, создаёт искажённые представления об основах теории относительности, создаёт впечатление, что величина  $\mathcal{E}/c^2$  играет роль инертной и гравитаци.  $M$ . Однако это не соответствует действительности. Напр., если ускоряющая сила параллельна скорости тела, то эмерой инертности является  $t$ . в «продольная масса»,  $m_l = m_0 \gamma^3$ . Др. пример — релятивистское обобщение ф-лы (6) на движение лёгкой частицы (электрона или фотона) в гравитаци. поле тяжёлого тела массы  $M$  (напр., Земли или Солнца). Можно показать (исходя из общей теории относительности), что в этом случае сила, действующая на лёгкую частицу, равна

$$F = -\frac{GM\mathcal{E}}{c^2} \left[ (1 + \beta^2) \frac{r}{r^3} - \frac{(v\beta)\beta}{r^2} \right], \quad (13)$$

где  $\beta = v/c$ . При  $\beta \rightarrow 0$  эта ф-ла переходит в (6). При  $\beta \sim 1$  величина, играющая роль «гравитаци.  $M$ », оказывается зависящей не только от энергии частицы, но и от взаимного направления  $r$  и  $v$ . Если  $v \perp r$ , то «гравитаци.  $M$ » равна  $\mathcal{E}/c^2$ , а если  $v \parallel r$ , то она равна  $(\mathcal{E}/c^2) \times (1 + \beta^2)$  [для фотона —  $2\mathcal{E}/c^2$ ]. Т. о., не имеет смысла говорить о «гравитаци.  $M$ » фотона, если для вертикального падающего на массивное тело (напр., Землю, Солнце) фотона эта величина в 2 раза меньше, чем для фотона, летящего горизонтально по поверхности тела. Именно это является причиной того, что угол отклонения фотона в гравитаци. поле Солнца оказывается в 2 раза больше, чем это следует из интерпретации величин  $\mathcal{E}/c^2$  как  $M$ .

В целом терминология, использующая понятия « $M$  покоя», « $M$  движения», ф-лы (11), (12) и т. п. артефакты, мешает понять сущность теории относительности, затрудняет в дальнейшем знакомство с совр. науч. литературой.

Лит.: 1) Einstein A., Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?, «Ann. Phys.», 1905, Bd. 18, S. 639—41; 2) Яинштейн А., Сущность теории относительности, пер. с англ., М., 1955, с. 7—44; 3) Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; 4) Тейлор Ф. Р., Уилер Д., Физика пространства — времени, пер. с англ., 2 изд., М., 1971. Д. В. Овчин.

**МАССА ПОКОЯ**  $m_0$  — масса частицы в системе отсчёта, в  $k$ -рой она покоится; одна из осн. характеристик элементарной частицы, обычно называемой просто её массой. См. также *Относительности теории*.

**МАССА ПРИВЕДЕННАЯ** — см. *Приведённая масса*.

**МАССА ПРИСОЕДИНЕННАЯ** — см. *Присоединённая масса*.

**МАССА СКРЫТАЯ** — см. *Скрытая масса*.

**МАССА ЭФФЕКТИВНАЯ** — см. *Эффективная масса*.

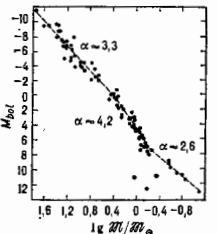
**МАСС-АНАЛИЗАТОР** — устройство для пространственного или временного разделения ионов с разл. значениями отношения массы к заряду. Один из осн. элементов *масс-спектрометра*.

**МАССА-СВЕТИМОСТЬ ЗАВИСИМОСТЬ** — отражает фундам. свойство стационарных звёзд, находящихся в тепловом и гидростатич. равновесии: чем больше масса звезды  $M$ , тем выше её светимость  $L$ . Зависимость установлена А. С. Эддингтоном (А. S. Eddington, 1921). На рис. представлена  $M$ — $L$  для звёзд гл. последовательности (см. *Герцшпрунга — Рассела диаграмма*), входящих в состав *двойных звёзд* с известными параметрами орбит компонентов и имеющих известные болометрич. светимости.

При тепловом равновесии кол-во энергии, выделяющееся в единицу времени в недрах звезды, равно кол-ву

энергии, излучаемому с её поверхности. Какалос бы, светимость звезды должна определяться только свойствами *термоядерных реакций*,  $k$ -рые являются источником энергии звёзд гл. последовательности. Однако светимость слабо зависит от скорости выделения энергии и определяется гл. обр. процессами переноса выделенной энергии из недр звезды к её поверхности. В большинстве звёзд перенос энергии осуществляется лучистой теплопроводностью, при  $k$ -рой поток переносимой энергии пропорционален градиенту температуры и зависит также от непрозрачности звёздного вещества. В каждой точке гидростатически равновесной звезды градиент давления уравновешивается силой тяготения, определяемой массой звезды. Средний по звезде градиент давления, как и градиент темп-ры, тем больше, чем больше масса звезды. Следовательно, и светимость звезды тем выше, чем больше её масса.

Непрозрачность вещества сильно зависит от характера взаимодействия излучения с веществом и от его



Зависимость масса — светимость для звезд, лежащих на главной последовательности или вблизи неё. По оси абсцисс отложена масса в относительных астрономических единицах, по оси ординат — болометрическая светимость, выраженная в абсолютных звездных величинах ( $M_{\text{абс}}$ ). Прямые линии изображают аппроксимирующие зависимости  $L \sim M^\alpha$  для трёх интервалов масс звезд.

хим. состава. Обычно  $M$ — $L$  представляют в виде степенной ф-ции  $L \sim M^\alpha$ . Если непрозрачность вещества по всей звезде определяется только процессами рассеяния на свободных электронах и доминирует давление излучения, то  $\alpha = 1$ . Если давление газа сопоставимо с давлением излучения, то  $\alpha = 3$ . В др. случае, когда по всей звезде при взаимодействии излучения с веществом преобладают тормозные процессы (связанные с изменением состояния свободных электронов), показатель степени лежит в пределах от 5,2 до 5,7 в зависимости от свойств термондерных реакций. В реальных звездах происходит одновременно процессы рассеяния, тормозные процессы, а также фотопроцессы, что приводит к отклонению значений  $\alpha$  от указанных выше. Кроме того, показатель степени  $\alpha$  является ф-цией массы звезды  $M$ , поскольку относит. роль процессов рассеяния, тормозных процессов и фотопроцессов, а также скорость выделения энергии зависит от массы звезды. Роль процессов рассеяния растёт с увеличением массы звезды.

Экспериментально можно выделить три области с приблизительно пост. значениями показателя степени (рис.):  $\alpha \approx 3,3$  при  $1,7 > M/M_\odot > 0,6$ ;  $\alpha \approx 4,2$  при  $0,4 > M/M_\odot > -0,2$  и  $\alpha \approx 2,6$  при  $-0,2 > M/M_\odot > -1,1$  ( $M_\odot$  — масса Солнца). Во всём диапазоне масс звёзд показатель степени  $\alpha$  больше единицы. Запас ядерной энергии в звезде пропорционален массе. Отсюда следует важная закономерность,  $k$ -рой подчиняются все звёзды: чем больше масса звезды, тем быстрее истощаются в ней запасы ядерной энергии и тем меньше время жизни звезды.

Лит.: Чандрасекар С., Введение в учение о строении звезд, пер. с англ., М., 1950; Д и б а й Э. А., Кап л а н С. А., Размерности и подобные астрофизических величин, М., 1976; Я г е р К. де, Звезды наибольшей светимости, пер. с англ., М., 1984. В. П. Угрюмов.

**МАССОВАЯ СИЛА** — сила, действующая непосредственно на каждую из частиц данного тела и численно пропорциональная массам этих частиц; то же, что *объёмная сила*. Пример  $M$ . с. — сила *тяготения*.

**МАССОВОЕ ЧИСЛО** — суммарное число  $A$  нуклонов (протонов и нейтронов) в атомном ядре. Различно для изотопов одного элемента, указывается справа вверху у символа хим. элемента (напр.,  $O^{17}$ ,  $C^{13}$ ). Одна из важнейших характеристик ядра, вместе с его зарядовым числом  $Z$  определяет свойства невозбуждённых ядер (массу, спин, магн. и электрич. моменты).

**МАССОВЫЙ ОПЕРАТОР** в квантовой теории поля — ф-ция, к-рую можно считать обобщением массы частицы, включающим эффекты взаимодействия квантовых полей. Напр., в квантовой электродинамике  $M$  о. электрона складается из собственно массы  $m$  и *радиационных поправок*, простейшая из к-рых отвечает однопетлевой *Фейнмана диаграмме* собств. энергии электрона (рис.). В импульсном представлении вклад этой диаграммы представляется расходящимся интегралом

$$\Sigma(p) = \frac{e^2}{(2\pi)^4} \int d^4k D_{\mu\nu}^c(k) \gamma^\mu S^c(p-k) \gamma^\nu,$$

где  $D_{\mu\nu}^c$  — *пропагатор фотона*,  $S^c$  — *пропагатор электрона*,  $\gamma^\mu$  — *Дирака матрицы* ( $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ ), но индексам  $\mu, \nu$  подразумевается суммирование ( $p, k$  — 4-импульсы электрона и виртуального фотона,  $e$  — электрич. заряд). После надлежащего устранения расходящ. частей (*перенормировки*) этот интеграл явно вычисляется, и соответствующее конечное выражение  $\Sigma$  в сумме с массой  $m$  образует  $M$  о. электрона:

$$M(p, \alpha) = m + \Sigma(p; \alpha); \quad \alpha = e^2/4\pi$$

(используется система единиц, в к-рой  $\hbar = c = 1$ ). С помощью  $M$  о. полый пропагатор электрона  $G(p; \alpha)$ , учитывающий радиац. поправки, записывается в виде, близком к свободному пропагатору:

$$G(p; \alpha) = [\hat{p} - M(p, \alpha)]^{-1},$$

где  $\hat{p}$  — *свёртка компонент 4-вектора  $p$  с матрицами Дирака*:  $\hat{p} = p_\mu \gamma^\mu$ .

**Лит.**: Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. *Квантовые поля*, 2 изд., М., 1988.  
**МАСС-СЕПАРАТОР** — прибор для измерения массовых чисел  $A$  нуклидов, образующихся в ядерных реакциях (на ускорителях или в ядерных реакторах). При изучении радиоактивных долгоживущих нуклидов (период полураспада  $T_{1/2} \geq 1$  мин) в качестве М.-с. используют статич. *масс-спектрометры* со спец. конструкцией ионного источника, позволяющей быстро помещать образец в источник ионов или облучать его непосредственно в масс-спектрометре. Для определения  $A$  короткоживущих нуклидов применяются М.-с. с торможением ионов в камере, наполненной газом в помещённой в поперечное магн. поле. При определ. условиях изменение заряда иона (при торможении ядра «обрастают» электронами) компенсируется изменением его скорости, и радиус траектории определяется разн. массой иона. ~ 400, мин. время анализа  $\sim 10^{-8}$  с.  
*И. О. Левинский.*

**МАСС-СЕПАРАЦИЯ** в плазме — пространственное разделение тяжёлых частиц с разной массой или зарядом в неравновесно однородном плазменном объеме, связанное с процессами ионизации и движением частиц в электрич. и магн. полях, практически всегда присутствующих в плазме. Поэтому М.-с. происходит в той или иной степени во всех плазменных системах. Так, напр., если на стеклянину трубку, содержащую при низком давлении смесь двух газов с разными коэф. ионизации, надеть обмотку, создающую бегущее электрич.

поле, то полем будет сильнее увлекаться легкоионизируемая компонента, что приведёт к М.-с.

Сепарация частиц по массам всегда проявляется в *плазменных ускорителях*. Напр., в ускорителях с замкнутым дрейфовым участком, родившиеся в одной точке и поэтому прошедшие одну и ту же разность потенциалов и пересекшие один и тот же магн. поток, на выходе из ускорителя имеют разные азимутальные скорости  $v \sim M^{-1}$  (следствие сохранения обобщённого момента кол-ва движения), что и приводит к сепарации. Чётко проявляется М.-с. тяжёлых ионов (примесей) в замкнутых *магнитных ловушках*, напр. в *токамаках*.

Приборы, специально предназначенные для разделения ионов по массам (точнее, по отношению  $M/e$ ), наз. *масс-сепараторами* и *масс-спектрометрами*. М.-с. подробно изучается в «плазменных центрифугах», к-рые представляют собой осесимметричные системы с продольным магн. и радиальным электрич. полями. Центр электрод такой центрифуги может быть твердотельным или плазменным. Поскольку центрифуговая сепарация аналогична отстаиванию в поле тяжести, она рассчитывается по барометрич. ф-ле, но на практике оказывается существенно меньше из-за разл. рода плазменных колебаний. Большие потенциальные возможности для создания плазменных масс-сепараторов открывает плазмооптика (см. *Плазмооптические системы*).

К системам М.-с. в плазме может быть отнесён *электр. метод разделения изотопов*, поскольку объёмный заряд движущихся в магн. поле ионных пучков нейтрализован малодвижущимися электронами, и такие пучки являются плазменными образованиями. Этот метод имеет промышленное применение (см. *Изотопное разделение*), остальные методы М.-с. в плазме находятся в стадии разработки.

**Лит.**: Морозов А. И., Лебедев С. В. *Плазмооптика*, в сб. Вопросы теории плазмы, под ред. М. А. Леонтовича, т. 8, М., 1974; Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям, Минск, 1978; Иванов А. А. *Неравновесная плазма для химии*, в кн.: Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы, т. 3, М., 1982; М и р о в С. В., Физические процессы в плазме токамака, М., 1982.  
*А. И. Морозов.*

**МАСС-СПЕКТРОМЕТР** — прибор для разделения ионизов. частиц (атомов, молекул, кластерных образований) по их массам (точнее, по отношению массы иона  $m$  к его заряду  $e$ ) путём воздействия магн. и электрич. полей, а также для определения их масс и относит. содержания, т. е. спектра масс. М.-с. включает: систему подготовки и ввода вещества в прибор (рис. 1);



Рис. 1. Блок-схема масс-спектрометра (пузырчатком обесч. вакуумированная часть прибора).

источник ионов, где это вещество частично ионизуется и осуществляется формирование ионного пучка; масс-анализатор, в к-ром происходит разделение ионов по величине  $m/e$  и фокусировка ионов, вылетевших в разл. направлениях в небольшом телесном угле; приемник ионов (коллектор), где ионный ток измеряется или преобразуется в электрич. сигнал, к-рый далее усиливается и регистрируется выходным устройством.

вом. В регистрирующее устройство помимо информации о кол-ве ионов (ионный ток) поступает информация о массе ионов. М.-с. содержит также питающие и измерит. устройства, а также вакуумную систему, создающую, поддерживающую и контролирующую достаточно глубокий вакуум ( $10^{-3}$ – $10^{-7}$  Па) в источнике ионов, камере масс-анализатора и приёмнике ионов. ЭВМ контролирует режим работы всего прибора, а также осуществляет сбор и обработку получаемых данных.

**Основные параметры.** Регистрируемый с помощью М.-с. масс-спектр представляет собой зависимость ионного тока  $I$  от массы  $m$  (точнее, от  $m/e$ ). Напр., в масс-спектре Hg каждый из пиков ионного тока соответствует однозарядным ионам изотопов ртути (рис. 2). Высота пика пропорциональна содержанию данного изотопа. Отношение массы иона к ширине пика  $\delta m$  ( $v$  а. е. м.), наз. разрешающей способностью ( $R$ ) М.-с.:  $R = m/\delta m$ . Т. к.  $\delta m$  на разных уровнях интенсивности ионного тока различна, то  $R$  также различна. В приведённом примере в области изотопа  $^{202}\text{Hg}$  на уровне 10% относительно вершины пика  $R = 940$ , на полувысоте  $R = 1600$ . Для полной характеристики разрешающей способности прибора необходимо знать форму ионного пика, к-рая зависит от мн. факторов. Иногда разрешающей способностью наз. значение той наиб. массы, при к-рой два пика, отличающихся по массе на единицу, разрешаются до заданного уровня. Для тех М.-с., у к-рых  $R$  не зависит от отношения  $m/e$ , оба приведённых определения совпадают. Считается, что М.-с. с  $R \leq 10^2$  имеет низкую разрешающую способность, с  $R \sim 10^2$ – $10^3$  — среднюю, с  $R \sim 10^3$ – $10^4$  — высокую, с  $R \sim 10^5$  — очень высокую.

Если вещество вводится в ионный источник в виде газа, то чувствительность М.-с. наз. отношение тока, создаваемого ионами данной массы заданного вещества, к парциальному давлению этого вещества в источнике. Эта величина в М.-с. разных типов лежит в диа-

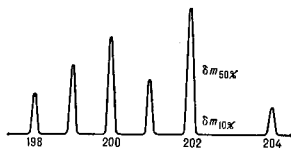


Рис. 2. Масс-спектр Hg;  $\delta m_{50\%}$  — ширина пика на полувысоте,  $\delta m_{10\%}$  — на уровне 10% от максимальной интенсивности.

пазоне  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  А/Па. Относит. чувствительностью называют мин. содержание вещества в смеси веществ, к-рое ещё может быть обнаружено с помощью М.-с. Для разных М.-с. и разл. веществ она лежит в диапазоне  $10^{-3}$ – $10^{-7}\%$ . За абс. чувствительность иногда принимают мин. кол-во вещества (в г), к-рое необходимо ввести в М.-с. для обнаружения этого вещества. Она также зависит от типа М.-с. и может достигать  $10^{-15}$  г.

Паряду с разрешающей способностью и чувствительностью важными характеристиками М.-с. являются диапазон масс и быстродействие. Диапазон масс у прибора для анализа органич. веществ превышает  $10^4$  а. е. м. (см. *Масс-спектроскопия*). Быстродействие, под к-рым принято подразумевать мин. время, необходимое для регистрации масс-спектра в пределах т. н. декады а. с. м. ( $1 - 10, 10 - 100$  и т. д.) без потери информации, составляет 0,1–0,5 с для статич. приборов и  $10^{-3}$  с для время-пролётных (динамических; см. ниже).

**Система ввода вещества. Ионный источник.** Образец вводится в М.-с. с помощью т. н. молекулярных или вязкостных нагнетателей, устройств шлюзования с по-

следующим вводом твёрдого или жидкого образца в источник ионов, ячейку Кнудсена и т. д.

В М.-с. используются разл. способы ионизации: 1) ионизация электронным ударом (см. *Электронно-ионная эмиссия*); 2) фотоионизация; 3) ионизация за счёт ионно-молекулярных реакций (хим. ионизация); 4) ионизация в сильном электрич. поле (полевая ионная эмиссия); 5) ионизация ионным ударом (ионно-ионная эмиссия, см. также *Ионная бомбардировка*); 6) ионизация быстрыми атомами (атомно-ионная эмиссия); 7) *поверхностная ионизация*; 8) *искровой разряд* (вакуумная искра); 9) десорбция ионов под действием лазерного излучения, электронных пучков, продуктов деления тяжёлых ядер (напр.,  $^{252}\text{Cf}$ ); 10) плазменные источники. Наиб. часто применяются: способы 1, 2 и 3 — при анализе газов и легко испаряемых веществ; 4 — для ионизации газов и органич. соединений, наносимых на поверхность электрода (десорбция полем); 5 — для анализа состава поверхности твёрдых тел; 6 и 9 — для анализа термостабильных сложных органич. веществ; 7 — для изотопного анализа элементов с низкой энергией ионизации; 8 и 10 для анализа микропримесей в твёрдом и жидком веществах. Если анализируют ионную составленную газу (плазма, ионосфера, плазма), источник ионов выполняет лишь функцию фокусировки ионов и формирования ионного пучка (см. также *Ионный источник*).

**Масс-анализаторы.** По типу анализаторов различают статич. и динамич. М.-с. В статич. масс-анализаторах для разделения ионов используются электрич. и магн. поля, постоянные или практически не изменяющиеся за время пролёта иона через прибор. Ионы с разл. значениями  $m/e$  движутся в анализаторе по разл. траекториям (см. *Электронная и ионная оптика*).

В масс-спектрографах, отличающихся от М.-с. фоторг. регистрацией масс-спектра, пучки

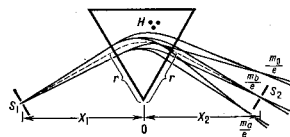


Рис. 3. Схема статического масс-спектрометра с однородным магнитным полем;  $S_1, S_2$  — щели ионного источника и приёмника ионов;  $H$  — область однородного магнитного поля;  $m/e$  — масс-заряд иона; тонкие сплошные линии — границы пучков ионов с разными  $m/e$ ;  $r$  — радиус центральной траектории иона.

ионов с разными  $m/e$  фокусируются в разных местах фотоэлектродов, расположенной в фокальной плоскости прибора, образуя после проявления следы в виде полосок (выходное отверстие ионного источника обычно имеет форму прямоугольника — щели). В статич. масс-спектрометре пучок ионов с заданным  $m/e$  фокусируется на щель приёмника ионов. При плановом изменении магн. или электрич. поля в приёмную щель последовательно попадают пучки ионов с разными  $m/e$ . При непрерывной записи ионного тока получается график с ионными пиками масс-спектра (рис. 2); фотоластинка, используемая в масс-спектрографе, после проявления фотометрируется.

В статич. М.-с. с однородным магн. полем  $H$  (рис. 3) ионы, образованные в источнике, выходят из щели шириной  $S_1$  в виде расходящегося пучка, к-рый в магн. поле разделяется на пучки ионов с разными  $m/e$  ( $m_0/e, m_1/e, m_2/e$ ). Пучок ионов с массой  $m_0$  фокусируется на щель шириной  $S_2$  приёмника ионов. Величина  $m_0/e$  определяется выражением

$$m_0/e = 4,824 \cdot 10^{-6} H^2 r^2 / V,$$

где  $m_0$  — масса иона в а. е. м.;  $e$  — его заряд в единицах элементарного электрич. заряда;  $r$  — радиус центр. траектории в см;  $V$  — ускоряющий потенциал в В;  $H$  — напряжённость магн. поля в Э. Раствёртка масс-спектра производится изменением  $H$  или  $V$ . Первый метод предпочтительнее, т. к. в этом случае по ходу развёртки не изменяются условия «вытягивания» ионов из источника.

Разрешающая способность статич. М.-с. определяется из соотношения

$$R = \frac{r}{\sigma_1 + \delta_1},$$

где  $\sigma_1$  — ширина пучка в месте, где он попадает в щель приёмника  $S_2$ . Если бы фокусировка ионов была идеальной, то в случае  $X_1 = X_2$  (рис. 3)  $\sigma_1$  была бы в точности равна  $S_1$ . В действительности  $\sigma_1 > S_1$ , что уменьшает разрешающую способность М.-с. Одна из причин уширения пучка — неизбежный разброс по кинетич. энергии у ионов, вылетающих из источника. Др. причины — рассеяние ионов из-за столкновений с молекулами остаточного газа, а также эд.-статич. «расталкивающие» ионов в пучке. Для ослабления влияния этих факторов применяют т. н. наклонное вхождение пучка в анализатор и криволинейные границы магн. поля. В нек-рых М.-с. используют неоднородные магн. поля, а также ионные приемы (см. *Электронные приемы*). Для уменьшения рассеяния ионов стремятся к созданию высокого вакуума (давление  $p \sim 10^{-8}$  Па  $\approx 10^{-8}$  мм рт. ст.) на всём пути ионов от источника до коллектора. Для ослабления влияния разброса по энергии применяют М.-с. с двойной фокусировкой, в к-рых в щель  $S_2$  фокусируются ионы с одинаковыми  $m/e$ , вылетающие не только по разным направлениям, но и с разными энергиями. Для этого ионный пучок пропускают через магнитное и отклоняющее электр. поля спец. формы (рис. 4).

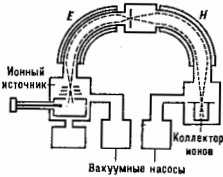


Рис. 4. Схема масс-спектрометра с двойной фокусировкой. Пучок ускоренных ионов, вышедших из щели источника ионов, проходит через электр. поле  $E$  цилиндрического конденсатора, который отклоняет ионы на  $90^\circ$ , затем через магнитное поле  $H$ , отклоняющее ионы еще на  $60^\circ$ , и фокусируется в щель коллектора.

В динамич. масс-анализаторах для разделения ионов с разными  $m/e$  используют, как правило, разные времена пролёта. Расстояния, а также воздействие на ионы импульсных или радиочастотных электрич. полей с периодом, меньшим или равным времени пролёта ионов через анализатор. Наиб. применение нашли время-пролётные, радиочастотные, квадруольные, магнитоэлектронные М.-с. и М.-с. ионно-циклотронного резонанса.

Во время *время-пролётного* М.-с. (рис. 5) ионы, образованные в источнике, коротким электрич. импульсом «выстреливаются» в виде ионного пакета через щель  $I$  в анализатор 2, представляющий собой электр. потенциальное пространство. В процессе дрейфа к коллектору 3 исходный пакет «распаивается» на нек. пакетов, каждый из к-рых состоит из ионов с одинаковыми  $m/e$ . Рассеивание обусловлено тем, что в исходном пакете энергии всех ионов одинаковы, а их скорости и, следовательно, времена пролёта  $t$  через анализатор длиной  $L$  обратно пропорциональны  $\sqrt{m}$ :

$$t = L\sqrt{m/2eV}.$$

Последовательность ионных пакетов, приходящих на

коллектор, образует масс-спектр, к-рый регистрируется. Разрешающая способность  $R$  с таким анализатором пропорциональна  $L$  и невелика ( $\sim 10^3$ ).

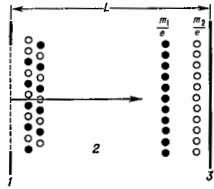


Рис. 5. Схема время-пролётного масс-спектрометра. Пакет ионов с массами  $m_1$  и  $m_2$  (чёрные и белые кружки) движется в дрейфовом пространстве анализатора так, что тяжёлые ионы ( $m_1$ ) отстают от лёгких ( $m_2$ ).

Вариантом *время-пролётного* анализатора является т. н. *масс-рефлектор*, позволяющий существенно увеличить разрешающую способность за счёт применения эд.-статич. зеркала 3 (рис. 6). Ионы в пакете обладают тепловым распределением по энергии, соответствующим темп-ре исходного газа. Это приводит к уширению пучка на коллекторе. Эд.-статич. зеркало 3 масс-рефлектора компенсирует это уширение, увеличивая в каждом пакете время прихода на коллектор более медленных ионов и уменьшая — более быстрых. При тех же длинах дрейфа разрешающая способность ( $R$ ) масс-рефлектора в нек. раз лучше  $R$  обычного *время-пролётного* М.-с.

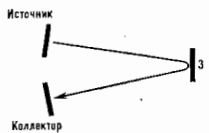


Рис. 6. Ионные траектории в масс-рефлекторе.

В радиочастотном масс-анализаторе (рис. 7) ионы приобретают в ионном источнике энергию  $eV$  и проходят через систему последовательно

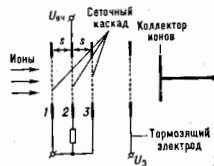


Рис. 7. Схема радиочастотного масс-анализатора. Ионы с определенной скоростью и, следовательно, определенной массой, ускоряясь внутри каскада ВЧ-сетки, получают прирост кинетической энергии, достаточный для преодоления тормозящего поля и попадания на коллектор.

расположенных сеточных каскадов. Каждый каскад представляет собой три плоскосторонних сетки 1, 2, 3, расположенные на равном расстоянии друг от друга. К сетке относительно двух крайних приложено электрич. ВЧ-поле  $U_{вч}$ . При фиксированных частоте  $\omega$  этого поля и энергии ионов  $eV$  только ионы с определённым  $m/e$  имеют такую скорость  $v$ , что, двигаясь между сетками 1 и 2 в полупериод, когда поле между ними ускоряет ионы, они пересекают сетку 2 в момент смены знака поля и проходят между сетками 2 и 3 также в ускоряющем поле. Т. о., они получают макс. прирост энергии и попадают на коллектор. Ионы др. масс, проходя эти каскады, либо тормозятся полем, т. е. теряют энергию, либо получают недостаточный прирост энергии и отбрасываются в конце пути от коллектора высоким тормозящим полем  $U_0$ . В результате на коллектор попадают только ионы с определ. значением  $m/e$ . Масса таких ионов определяется из соотношения

$$m = aV/s^2\omega^2,$$

где  $a$  — постоянная прибора,  $s$  — расстояние между сетками. Перестройка анализатора на регистрацию ио-

нов др. масс осуществляется изменением либо нач. энергии ионов (V), либо частоты  $\omega$  поля.

В квадрупольном масс-анализаторе (рис. 8) разделение ионов осуществляется в по-

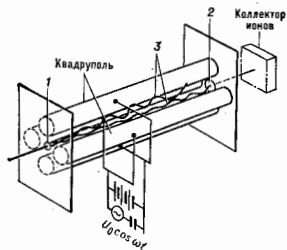


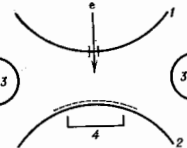
Рис. 8. Схема квадрупольного масс-анализатора.

речном электрич. поле с гиперболич. распределением потенциала. Поле создается квадрупольным конденсатором, между парами стержней к-рого приложены постоянное и ВЧ-напряжения. Пучок ионов вводится в вакуумную камеру анализатора вдоль оси квадрупольного конденсатора через отверстие 1. При фиксиров. значениях частоты  $\omega$  и амплитуды  $U_0$  перем. напряжения только у ионов с определ. значением  $m/e$  амплитуда колебаний в направлении, поперечном осе анализатора, не превышает расстояния между стержнями. Такие ионы за счёт нач. скорости проходят через анализатор и, выходя из него через отверстие 2, регистрируются, попадая на коллектор ионов. Сквозь квадруполь проходят ионы, масса к-рых удовлетворяет условию

$$m = aU_0/\omega^2,$$

где  $a$  — постоянная прибора. Амплитуда колебаний ионов др. масс нарастает по мере их движения в анализаторе так, что эти ионы достигают стержней и нейтрализуются. Перестройка на регистрацию ионов др. масс осуществляется изменением амплитуды  $U_0$  или частоты  $\omega$  перем. напряжения. Разрешающая способность квадрупольных М.-с.  $R \sim 10^3$ .

Рис. 9. Трёхмерная квадрупольная ионная ловушка: 1 — гиперболический электрод с отверстием для ввода ионизирующих электронов; 2 — гиперболический электрод с стеной; 3 — кольцевой гиперболический электрод; 4 — коллектор ионов.



Вариантом квадрупольного анализатора служит т. н. трёхмерная квадрупольная ловушка (рис. 9), представляющая собой два гиперболоида вращения, ограниченных по бокам кольцевым электродом 3, также с гиперболич. сечением внутр. поверхности. Электроды 1 и 2 заменены, на электрод 3 подается ВЧ-напряжение. В электроде 1 имеется отверстие для ввода ионизирующих электронов; электрод 2 выполнен в виде сетки, за к-рой расположен коллектор 4. Ионы образуются внутри ловушки электронным ударом (импульсно включается электронный пучок). После импульса прикладывается ВЧ-напряжение, измененной амплитуды к-рого осуществляют развёртку масс-спектра. Из-за симметрии ловушки ионы попадают как на верхний, так и на нижний электроды. В приведённой на рис. 9 конструкции регистрируется  $1/2$  сигнала.

Трёхмерная ловушка объединяет в себе ионизатор и анализатор.

В магниторезонансном масс-анализаторе (рис. 10) используется постоянство вре-

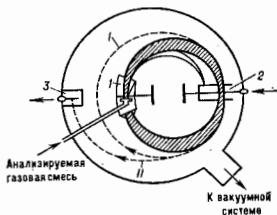


Рис. 10. Магниторезонансный масс-анализатор (магнитное поле перпендикулярно плоскости рисунка).

мени облёта ионами массы  $m$  круговой траектории. Из ионного источника 1 близкие по массе ионы (область траекторий к-рых заштрихована), двигаясь в однородном магн. поле, попадают в модулятор 2, где формируется тонкий пакет ионов, к-рые за счёт полученного в модуляторе ускорения начинают двигаться по окружности большого радиуса. Разделение по массам осуществляется в результате ускорения «резонансных» ионов, циклотронная частота к-рых  $\omega_c$  равна частоте  $\omega$  поля модулятора или  $\omega = n\omega_c$  ( $n$  — целое число). Такие ионы в течение неск. оборотов ускорятся модулятором и, двигаясь по окружностям всё большего радиуса, попадают на коллектор 3. Масса регистрируемого иона обратно пропорциональна  $\omega$ . Разрешающая способность  $R \sim 2,5 \cdot 10^4$ .

В М.-с. ионно-циклотронного резонанса (рис. 11) происходит резонансное поглощение ионами эл.-магн. энергии при совпадении циклотронной частоты ионов с частотой перем. электрич. поля в анализаторе. Это позволяет идентифицировать ионы с данной величиной  $m/e$  по резонансному поглощению. Ионы движутся в однородном магн. поле  $H$  по спирали с циклотронной частотой орбитального движения  $\omega_c = eH/mc$  и попадают на коллектор. Для улучшения характеристик применяют сверхпроводящие

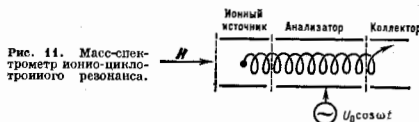


Рис. 11. Масс-спектрометр ионно-циклотронного резонанса.

соленоиды, в к-рых поглощающая ячейка с источником ионов и коллектором находится в магн. поле напряжённостью до  $10^5$  Э. Разрешающая способность  $R \sim 10^5$ .

При исследованиях, в к-рых требуется сочетание высокой разрешающей способности с большой чувствительностью, широким диапазоном измеряемых масс и воспроизводимостью результатов измерений, применяют статич. масс-анализаторы. Динамич. М.-с. используются в след. случаях: время-продлётные — для регистрации процессов длительностью от  $10^2$  до  $10^{-8}$  с; радиочастотные (малые масса, размеры и потребляемая мощность) — в космич. исследованиях; квадрупольные (высокая чувствительность) — при работе с молекулярными пучками; магниторезонансные — для измерения очень больших изотопных отношений; М.-с. ионно-циклотронного резонанса — для изучения ион-

по-молекулярных реакций (подробнее см. в ст. *Масс-спектрокопия*).

Регистрация ионных токов. Величины ионных токов  $I$ , создаваемых в М.-с., определяют требования к их усилению и регистрации. При ионизации электронов ударом (при энергии электронов 40–100 эВ и ширине щели источника  $S_1$  в неск. десятков мкм)  $I \sim 10^{-10}$ – $10^{-9}$  А. Чувствительность применяемых в М.-с. усилителей —  $10^{-15}$ – $10^{-18}$  А при постоянной времени от 0,1 до 10 с. Дальнейшее повышение чувствительности или быстродействия М.-с. достигается применением вторично-электронных умножителей, повышающих чувствительность до  $10^{-18}$ – $10^{-19}$  А, а также систем, позволяющих регистрировать отд. ионы (см. *Вторичная электронная ямка*).

Такая же чувствительность достигается в масс-спектрографах за счёт длит. экспозиции. Однако из-за малой точности измерения ионных токов и громоздкости устройств введения фотоластин в вакуумную камеру анализатора фоторегистрация уступает место *координатным векторам* частей, особенно тех случаев, когда необходимо одновременно регистрировать большой участок масс-спектра (из-за нестабильности источника ионов, напр. при элементном хим. анализе в случае ионизации вакуумной искрой).

**Лит.** Масс-спектрометрический метод определения следов, пер. с англ., М., 1975; Сизов В. А., Чу га х и м М. С. Введение в масс-спектрометрию, М., 1977; Кинетическая масс-спектрометрия и её аналитические применения. Сб. ст., под ред. В. Л. Талрозе, М., 1979; Род я н к о в а А. А., Молекулярный масс-спектральный анализ органических соединений, М., 1983; Масс-спектрометрия и химическая кинетика. Сб. ст., под ред. В. Л. Талрозе, М., 1985; К е л ь м а н В. М., Р о д я н к о в а И. М., С е в и н о в а Л. М., Статистические масс-спектрометрия, А.-А., 1985; В о л г а с о в А. С. The ideal mass analyzer: fact or fiction?, «Int. J. of Mass Spectrom. and Ion Processes», 1987, v. 76, № 2, p. 125. В. Л. Талрозе.

**МАСС-СПЕКТРОСКОПИЯ** (масс-спектрометрия, масс-спектрография, масс-спектральный анализ) — метод исследования вещества путём определения массы  $m$  (чаще, отношения массы к заряду  $m/e$ ) и относит. кол-ва ионов, образующихся (или имеющихся) в веществе. М.-с. применяется для прецизионного определения массы ионов, изотопного анализа, молекулярного хим. анализа, идентификации и установления структуры сложных органич. молекул и др.

Прецизионное измерение масс ионов осуществляется обычно с помощью *масс-спектрометров* высокой разрешающей способности  $R \geq 10^4$ . Оно основано на определении положения максимума (пика) на шкале масс и сравнении его с эталонными пиками. Макс. точность обеспечивается при совмещении эталонного и исследуемого пиков, образуемых ионами с одинаковым числом нуклонов (массовым числом  $A$ ), но разным составом ядер (дублетов). При этом достигается измерение относит. разности масс дублета с погрешностью порядка  $10^{-8}$ . Для получения эталонных пиков используют перфторкеросин, масс-спектр к-рого состоит из большого числа пиков в интервале  $A$  от 69 до 1200.

М.-с. возникла в первые десятилетия 20 в. [Дж. Дж. Томсон (J. J. Thomson), 1912; Ф. У. Астон (F. W. Aston), 1919] и являлась одним из осн. методов определения масс ядер (Астоном было открыто 212 стабильных нуклидов). В дальнейшем центр исследования сместился в область анализа сложных органич. веществ. Однако с появлением масс-спектрометров ионно-циклотронного резонанса появилась возможность устанавливать массу иона с точностью лучше, чем  $10^{-8}$  а. е. м., что индустрировало интерес к прецизионным измереним масс ядер. Напр., удалось измерить разность масс в дублете  ${}^3\text{He}^+ - {}^3\text{T}^+$  с точностью до неск. эВ, позволяющей судить о наличии массы покоя у антинейтрино (см. *Нейтрино, Бета-распад нейтрона*). Дальнейшее повышение точности открывает перспективу определить энергии хим. связей (составляли массы молекулы и составляющих её атомов).

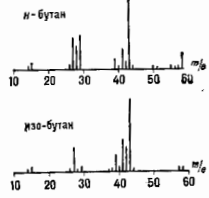
**Изотопный анализ.** Измеряются отношения ионных токов, соответствующих ионам с одинаковым зарядом и хим. составом, но с разл. изотопным составом. Эта задача наиб. проста в случае одноатомных газов. Поэтому при анализе изотопного состава ряда элементов используются их газообразные соединения (H — в виде  $\text{H}_2$ , O — в виде  $\text{O}_2$ , C — в виде  $\text{CO}_2$ , U — в виде  $\text{UF}_6$  и т. д.). При этом приходится учитывать влияние т. и. л. з о т о п н ы х э ф ф е к т о в (различия в скоростях испарения изотопных молекул, если вещество испаряют в ионном источнике; различия в вероятностях эмиссии ионов, если применяют методы *поверхностной ионизации*, искрового разряда, вторичной ионной эмиссии, эмиссии под действием лазерного излучения и т. д.) на вероятности диссоциации молекул при ионизации. В случае молекул, содержащих разнородные атомы, необходимо учитывать вклад в интенсивность соответствующих пиков (масс-спектральных линий), обусловленных изотопами других элементов. Масс-спектрометры с высоким разрешением позволяют идентифицировать, например, компоненты таких мультиплетов, как  $\text{H}^+ - \text{DH}^+ - \text{T}^+$ . Повышают точность метода относит. измерения, когда исследование образца с неизвестным изотопным составом чередуется с измерениями в тех же самых условиях стандартного образца близкого изотопного состава.

Выбор метода ионизации определяется свойствами соединений. Так, для металлов, энергия ионизации к-рых  $\leq 7,5$  эВ, наиб. удобен метод *поверхностной ионизации*.

Изотопный анализ применяется не только в физ. и хим. исследованиях, но и в геологии (см. *Послемонология*), биологии и особенно в ядерной энергетике (метод производств. контроля).

**Идентификация и установление структуры многоатомных органич. соединений.** Электроны с энергией неск. десятков эВ способны не только выбить электрон из исходной молекулы, но и возбудить образованвшейся молекулярный ион до энергии, к-рая достаточна для его распада на ионы-осколки (диссоциативная ионизация). Набор образованных ионов представляет собой молекулярный масс-спектр исходной молекулы. Напр., масс-спектр метана состоит из ионов  $\text{CH}_4^+$  (48%),  $\text{CH}_3^+$  (39%),  $\text{CH}_2^+$  (7%),  $\text{CH}^+$  (4,5%),  $\text{C}^+$  (1,5%). Масс-спектр вещества является его характеристикой и несёт информацию о мол. массе и структуре исходной молекулы. В случае простейших молекул для описания диссоциативной ионизации используют метод *потенциальных кривых* (потенциальных поверхностей) в сочетании с принципом Франка — Кондона. Теория диссоциативной ионизации для многоатомных молекул пока нет. Предполагается, что диссоциативная ионизация происходит позднее процесса ионизации, после того как энергия возбуждения молекулярного иона успела (за время  $t \sim 10^{-12}$ – $10^{-8}$  с) распространиться по степеням свободы. Это позволило полиумерить, путём расщипать молекулярные масс-спектры нек-рых веществ.

На характеристичности масс-спектров веществ основан как качественный, так и количественный анализ хим. состава смесей. Степень характеристичности такова, что она позволяет различать любые хим. соединения, во мн. случаях и изомеры (см. рис. в ст. *Изомерия молекул*). Молекулярные масс-спектры, полученные с помощью разных масс-спектрометров, различаются в большинстве случаев лишь на неск. % (в редких случаях — на 10%). Существуют библиотеки масс-спектров,



содержание молекулярных масс-спектры ок.  $10^4$  веществ. Такими библиотеками являются ЭВМ, входящие в комплект масс-спектрометров. Их программное обеспечение позволяет идентифицировать вещество, сопоставляя арегистр. масс-спектр с каталожным, а в случае отсутствия молекулярного масс-спектра каталог «подсказывает», к какому классу соединений относится вещество, какие структурные фрагменты содержит.

Измерение массы молекулярного многоатомного иона в сочетании с предвар. сведениями о составе соединения даёт возможность либо однозначно, либо путём выбора из неск. вариантов установить ф-лу молекулы. Напр., измеренная масса молекулярного иона составляет  $345,2290 \pm 0,0010$  а. е. м. Ей могут соответствовать вещества  $C_{11}H_{10}O_8$  (345,228),  $C_{11}H_{10}N_4O_8$  (345,229),  $C_{11}H_{10}NO_8$  (345,230).

С ростом мол. массы, как правило, падает вероятность перевода вещества без разложения путём нагрева в газовую фазу и образования молекулярного иона. В этом случае используются след. методы ионобразования: *фотоионизация*; хим. ионизация в результате передачи заряда (чаще путём переноса протона) исследуемому молекулу ионами, образующимися при взаимодействии с ионизир. электронами молекул газа-реагента; ионизация в сильном электрич. поле; ионизация быстрыми атомами; десорбция ионов импульсным лазерным излучением; десорбция ионов пучком электронов; десорбция ионов продуктами деления тяжёлых ядер ( $^{235}U$ ).

Время жизни иона в масс-спектрометре обычно  $< 10^{-6}$  с.

В статич. масс-спектрометрах медленные распады  $\tau \geq 10^{-6}$  с проявляются в виде «метастабильных» пиков — упрежденных линий, регистрируемых на месте т. н. кажущейся массы  $m^*$ . За их появление ответственен ионный распад атома  $M^+$  в бесловном пространстве:  $M^+ > M_1^+ + M_2$ . Кажущаяся масса  $m^*$  связана с массами ионов  $M^+(m)$ ,  $M_1^+(m_1)$  и атома  $M_0(m_0)$  соотношением

$$m^* = m_1/m = (m - m_0)^2/m.$$

Такие распады, несущие информацию о структуре исходной молекулы, можно возбудить за счёт столкновений, используя метод tandemной М.-с. Первый масс-анализатор выделяет ион, определяя массу. Далее ион попадает в камеру столкновений; заряд, продукты его распада регистрируются вторым масс-анализатором.

Анализ химического состава смесей. При молекулярном масс-спектральном анализе анализируют газообразную смесь, поступающую в ионный источник масс-спектрометра, так, чтобы наим. доля вещества попала на раскалённый катод (и там разлагалась). Качественный анализ основан на измерении либо массы нерастворившегося молекулярного иона, либо распределения интенсивности линий в масс-спектре каждого вещества. Осн. способом ионизации является ионизация электронным ударом с энергией электронов в неск. десятков эВ. Количественный анализ основан на пропорциональности интенсивности всех линий масс-спектра каждого из веществ его парциальному давлению в области ионизации. Суммарный масс-спектр смеси — аддитивное наложение масс-спектров каждого из компонентов смеси. Для того чтобы состав смеси в области ионизации не отличался от исходного, стремятся обеспечить молекулярное (квуденеповское) натекание газа в ионный источник. Для градуировки используют масс-спектры компонентов смеси и определяют относит. или абс. коэф. чувствительности масс-спектрометра к данному веществу. Абс. коэф. чувствительности — отношение интенсивности линии, принятой за эталонную, к кол-ву этого вещества в напущенном объёме; относит. чувствительность — отношение абс. чувствительности для 2 веществ. Относит. чувствительность прибора меняется со временем не более чем на неск. % (абс. чувствительность колеблется больше).

Присоединяя масс-спектр к хим. реактору, можно обнаружить короткоживущие активные частицы, свободные радикалы и атомы в реагирующих смесях при давлениях до  $10^3$  Па. При этом должны быть предусмотрены меры предотвращения гибели активных частиц до их попадания в область ионизации (стеклянные напущные диафрагмы, техника молекулярных пучков).

Эффективность М.-с. как метода молекулярного анализа резко возрастает при его комбинации с др. методами, особенно с хроматографией (присоединение масс-спектрометра к выходу газового или жидкостного хроматографа). Такие системы применяются в фармакологии, биологии и др., а также для определения загрязнений окружающей среды. При этом млн. кол-ва детектируемых веществ составляют  $10^{-12}$  г.

Исследование элементарных процессов (процессов, происходящих при образовании ионов и возбуждённых частиц и при их реакциях с молекулами в ионном источнике). С помощью масс-спектрометра определяют критич. энергию электронов, при к-рой в масс-спектре появляется соответствующий ион. Критич. энергия появления однозарядного молекулярного иона наз. вертикальной энергией ионизации. В большинстве случаев она близка разности энергий молекулы и молекулярного иона (в осн. состоянии). Энергия появления осколочного иона  $R_1^+$  в результате элементарного процесса  $R_1R_2 + e = R_1^+ + R_2 + 2e$  равна в общем случае:  $A(R_1^+) = I_1(R_1) + D(R_1 - R_2) + E(R_1^+) + E(R_2) + E_k$ . Здесь  $D$  — энергия разрыва связи  $R_1 - R_2$ ;  $I_1(R_1)$  — энергия ионизации радикала  $R_1$ ;  $E(R_1^+)$ ,  $E(R_2)$  — энергии возбуждения осколков;  $E_k$  — суммарная кинетич. энергия осколков  $R_1^+$  и  $R_2$ , получаемая ими в акте диссоциативной ионизации. Измеряя  $A(R_1^+)$  и пользуясь независимыми данными о величинах  $I_1$  и  $E$ , рассчитывают энергию, необходимую для разрыва связи.

Для определения критич. энергий ионизации применяют методы фотоионизации и ионизации электронным ударом (мозонвергенч. пучок).

Элементный анализ (исследования элементарного состава твёрдых и жидких веществ, в первую очередь металлич. сплавов, полупроводников, геологич. объектов земного и внеземного происхождения). В связи с малой летучестью большинства таких веществ их одноврем. испарение и ионизация осуществляются в вакуумном искровом разряде с одноврем. регистрацией большого участка масс-спектра либо на фотопластике, либо с помощью пространственно протяжённых детекторов. Чувствительность метода для большинства элементов порядка  $10^{-8}$ — $10^{-7}$ % (путём обогащения примесями добиваются чувствительности 10-10% и лучше). Для элементного анализа наряду с вакуумной искрой применяют лазерную ионизацию, вторичную ионную эмиссию, а также жидкометаллич. ионные источники. С помощью М.-с. проводят как общий, так и локальный, и послышной элементные анализы. При этом толщина, подвергающаяся анализу, составляет неск. мономолекулярных слоёв, локальность — меньше 1 мкм. Для общего анализа наиб. удобно использовать вакуумную искру, для послышной — ионно-ионную эмиссию, для локального — лазер. Масс-спектральный элементный анализ поверхности слоя твёрдого тела получил особое значение в микроэлектронике. Для элементного анализа жидких растворов применяют ионизацию в илдутивно связанной плазме.

Термодинамические исследования (изучение состава газовой фазы и термодинамик. характеристик металлов и сплавов). Исследуемый образец помещают в ячейку из инертного материала с малым отверстием (печка Квудсена) и нагревают до необходимой темп-ры. Скользящий молекулярный пучок попадает в ионный источник масс-спектрометра. По масс-спектру нара, его

зависимости от темп-ры, от времени при пост. темп-ре, от энергии ионизирующих электронов со стороны газовой фазы, рассчитывают *эталонные* равновесных процессов, эталонный образования, энергии разрыва связей в молекулах и т. п. Информации, получаемая этим методом, имеет применение в материальном, в расчёте конструкций узлов и установок, работающих в экстремальных условиях, и т. д.

Другие исследования (верхних слоёв атмосферы, космического пространства, электрического газового разряда и ионизации в плазмах). На спутниках, ракетах, авиатм. межпланетных станциях устанавливают, как правило, один из вариантов динамич. масс-спектрометров.

Масс-спектральное исследование ионов, образующихся в плазмах, позволило выявить ряд происходящих процессов и, в частности, установить важную роль кластерных и сольватиров. ионов.

Лит. см. при ст. *Масс-спектрометр*.

В. Л. Толкаров, Ю. С. Ходеев.

**МАССЫ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ** (методы определения). В основе определения  $M_1$ , т. е. лежит *всемирного тяготения закон*. В астрономии часто (но не всегда) можно пренебречь размерами небесных тел по сравнению с разделяющими их расстояниями и отличить их формы от точной сферы, т. е. упродобить небесные тела точечным массам.

Масса Земли может быть определена по величине ускорения свободного падения  $g$ :

$$M_3 = gR_3^2/G.$$

Величина  $g$  определяется гравиметрич. методами (см. *Гравиметр, Гравиметрия*), а  $R_3$  — на основе геодезич. измерений. Таким путём найдено, что масса Земли  $\approx 6,0 \cdot 10^{27}$  г. Более точно  $M_3$  (вернее, произведение  $GM_3$ ) определяется по наблюдениям ИСЗ или космич. аппаратов. Помимо массы Земли, прямым гравиметрич. методом измерения силы тяжести на поверхности небесного тела можно определить массу Луны, а в дальнейшем всех планет и их спутников с твёрдой поверхностью.

Определение массы Земли является первым звеном в цепи определений масс др. небесных тел (Луны, планет, Солнца, а затем и др. звёзд). Массы этих тел находят, опираясь либо на 3-й закон Кеплера (см. *Кеплера законы*), либо на след. правило: расстояния к-л. масс от общего центра масс обратно пропорциональны самим массам. Это правило позволяет, в частности, определить массу Луны. Отношение расстояний центров Луны и Земли от центра масс системы Земля — Луна (барцентра) равно  $1/81,3$ , т. е.  $M_3 \approx (1/81,3)M_3 \approx 7,35 \cdot 10^{24}$  г.

Массу Солнца ( $M_\odot$ ) можно определить, применив 3-й закон Кеплера к движению Земли (вместе с Луной) вокруг Солнца и к движению Луны вокруг Земли:

$$\frac{a_3^3}{T_3^2(M_\odot + M_3)} = \frac{a_1^3}{T_1^2(M_3 + M_1)}, \quad (1)$$

где  $a$  — большие полуоси орбит,  $T$  — периоды (звёздные, или сидерические) обращения. Если пренебречь массой Земли по сравнению с массой Солнца, то отношение  $M_\odot/(M_3 + M_1)$  оказывается равным 323990, откуда  $M_\odot \approx 2 \cdot 10^{33}$  г.

Ф-ла (1) даёт возможность сравнить массы Солнца и любой планеты, имеющей спутник, или массы двух планет, имеющих спутники. Массы планет, у к-рых нет спутников, определяют по возмущениям, оказываемым ими на движение соседних планет.

Массу звезды (помимо Солнца) можно определить со сравнительно большой надёжностью только в том случае, если она является физ. компонентом визуальной двойной звезды (см. *Двойные звёзды*), расстояние до к-рой известно. 3-й закон Кеплера в этом случае

даёт сумму масс компонентов (в единицах солнечной массы):

$$M_1 + M_2 = \left(\frac{a''}{\pi''}\right)^3 \frac{1}{P^3},$$

где  $a''$  — большая полуось (в секундах дуги) относительной орбиты спутника вокруг главной (обычно более яркой) звезды, к-рую в этом случае считают неподвижной;  $P$  — период обращения в годах;  $\pi''$  — параллакс системы (в секундах дуги). Величина  $a''/\pi''$  даёт значение большой полуоси орбиты в а. е. Если можно измерить ул. расстояния  $r_1$  и  $r_2$  компонентов от общего центра масс [напр., по положению каждого компонента относительно несколько более слабых звёзд (звёзд фона) или в случае заметного собств. движения центра масс, как у Сириуса и его спутника], то находят отношение масс,  $M_2/M_1 = r_1/r_2$ , следовательно, массу каждой звезды в отдельности.

Для определения малых значений  $\rho$  у *тесных двойных звёзд* успешно применяются методы *спекта-интерферометрии*. Если компоненты двойной имеют примерно одинаковый блеск и сходные спектры, то подсумма масс даёт достаточно надёжную оценку массы каждого компонента и без дополнит. определения отношения  $M_1/M_2$ .

Для др. типов двойных звёзд (затменно-двойных и спектрально-двойных) имеется ряд возможностей приблизительно определить массы звёзд или оценить их ниж. предел.

Совокупность данных о массах компонентов более чем сотни двойных звёзд разных типов позволила обнаружить важную статистику. *масса — светимость зависимость*. На основе этой зависимости оценивают массы одиночных звёзд по их *светимостям*.

Ещё один метод оценки массы звезды связан с измерением гравитац. *красного смещения* спектральных линий в поле тяготения. В сферическом симметричном поле тяготения звезды оно эквивалентно доплеровскому красному смещению:

$$\Delta\nu_r = 0,635 M_{33}/R_{33}, \quad (2)$$

где  $M_{33}$  — масса звезды в единицах массы Солнца,  $R_{33}$  — радиус звезды в единицах радиуса Солнца,  $\Delta\nu_r$  — в км/с. Соответствие (2), наиб. успешно применяемое к белым карликам, проверено по ряду белых карликов, входящих в состав двойных систем. Для них были известны радиусы, массы и истинные *лучевые скорости*.

У т. н. *астрометрич. двойных звёзд* один компонент невидим. Массу невидимого (тёмного) спутника звезды можно оценить по колебаниям положения звезды, связанным с её движением около общего центра масс. Невидимые спутники звёзд имеют массы меньше  $0,2 M_\odot$  и, вероятно, похожи на планеты. Возможно, что вместо одного тёмного спутника имеются два-три, а может быть, и большее число спутников (планет), т. е. планетные системы.

На релятивистском эффекте вращения линии аспид орбиты звёзд-компаньона (вдобавно эффекту вращения линии аспид планетарных орбит, см. *Талогенные*) основан ещё один способ определения масс компонентов двойной звезды.

Массы звёзд заключены в пределах прибл. от 0,03 до  $60 M_\odot$  (теоретич. предел стабильной массы нормальной звезды  $\approx 82 M_\odot$ ). Наиб. число звёзд имеет массы от 0,3 до  $3 M_\odot$ , много более половины звёзд входит в двойные системы. Ср. масса звезды в ближайших окрестностях Солнца  $\approx 0,5 M_\odot$ , т. е.  $\approx 1 \cdot 10^{33}$  г. Различие в массах звёзд оказывается много меньшим, чем их различие в светимостях (последнее может достигать десятков млн.). Сильно отличаются радиусы звёзд. В результате диапазон их ср. плотностей от  $5 \cdot 10^{-8}$  г/см<sup>3</sup> (красные гиганты) до  $10^9$  г/см<sup>3</sup> (белые карлики) и даже  $\approx 10^{14-15}$  г/см<sup>3</sup> (нейтронные звёзды). Ср. плотность Солнца равна  $1,41$  г/см<sup>3</sup>.



Массу рассеянного звездного скопления можно найти, сложив массы всех его членов, светимости к-рых определяют по их видимому блеску и расстоянию до скопления, а массы — по зависимости масса—светимость.

Массу шарового звездного скопления  $M_{СК}$  далеко не всегда можно оценить путём подсчёта звезд, т. к. изображения звезд центра области большинства шаровых скоплений на фотографиях, полученных с оптич. аксоидией, сливаются в одно светящееся пятно. Есть методы оценки общей массы всего скопления, основанные на статистич. принципах. Так, напр., применение *вириала теоремы* позволяет оценить  $M_{СК}$  по эфф. радиусу скопления  $R_{СК}$  и ср. квадрату отклонения  $(\Delta v)^2$  лучевой скорости отд. звезд от её ср. значения (т. е. от лучевой скорости скопления как целого):

$$M_{СК} \approx 800(\Delta v)^2 R_{СК}$$

(здесь  $M_{СК}$  в  $M_{\odot}$ ,  $\Delta v$  в км/с,  $R_{СК}$  в кпк).

Если возможен подсчёт всех звезд — членов шарового скопления, то общую массу скопления можно определить как сумму произведений  $M_i \phi(M_i^*)$ , где  $\phi(M_i^*)$  — ф-ция светимости этого скопления, т. е. ф-ция, показывающая число звезд, приходящихся на разл. интервалы значений абс. звездных величин  $M_i^*$  (обычно их подсчитывают в интервалах, равных  $1^m$ ), а  $M_i$  — масса, соответствующая данной звездной величине  $M_i^*$  по зависимости масса — светимость. Т. о., общая масса скопления

$$M_{СК} = \sum M_i \phi(M_i^*),$$

где сумма взята от самых ярких до самых слабых членов скопления.

Метод определения массы Галактики  $M_G$  использует факт вращения Галактики. Устойчивость вращения позволяет предположить, в частности, что центрострем. ускорение Солнца определяется притяжением массы  $M_G$  всего вещества Галактики внутри сферы с радиусом  $r_0$ , где  $r_0$  — расстояние Солнца от центра Галактики, равное грмб. 3 · 10<sup>17</sup> см. Ср. гравитац. ускорение Солнца  $g_0 = GM_G/r_0^2$  равно его центрострем. ускорению  $v^2/r_0$  (без учёта влияния внеш. части Галактики и при условии адиабатности поверхностной равной плотности в её внутр. части). Состав. галактич. скорость Солнца (т. н. круговая скорость на расстоянии  $r_0$  от центра)  $v_0 \approx 220$  км/с, отсюда  $M_G = v_0^2/r_0 \approx 1,6 \cdot 10^8$  см/с<sup>2</sup> и  $M_G = g_0 r_0^2/G \approx 2,2 \cdot 10^{11}$  г. Масса Галактики в сферич. объёме радиусом  $\approx 15$  кпк, как показывают подобные расчёты, равна  $\approx 3 \cdot 10^{11}$  г  $\approx 1,5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ . При этом учитывается также масса всей диффузной (рассеянной) материи в Галактике.

Масса спиральной галактики может быть определена по результатам изучения её кривой вращения (см. *Вращение галактик*). Кривые вращения указывают на наличие больших масс невидимого (невидящегося) вещества (т. н. *скрытой массы*). Масса невидимого вещества галактик может в 10 раз и более превосходить массу светящегося (излучающего) вещества.

Для медленно вращающихся галактик, какими являются, напр., эллиптич. галактики, трудно получить кривую вращения, но зато можно по расширению спектральных линий оценить дисперсию скоростей звезд в системе и, сопоставив её с истинными размерами галактики, по теореме о вириале оценить массу эллиптич. галактики.

Ещё один способ оценки масс галактик, входящих в двойные системы, аналогичен методу оценки масс компонентов спектрально-двойных звезд. Используют также установленную статистич. зависимость между массой и интегральной светимостью галактик разл. типа (своего рода зависимость масса — светимость для галактик). Светимость определяется по видимой

интегральной звездной величине галактики и расстоянию до неё, оценённому по величине красного смещения спектральных линий.

Известные ныне массы галактик заключены в пределах от  $\sim 10^8 M_{\odot}$  — для т. п. карликовых галактик до  $\sim 10^{12} M_{\odot}$  — для сверхгигантских эллиптич. галактик (напр., для галактики М87).

Общая масса галактик, входящих в скопления *галактик*, определяется суммированием масс галактик данного скопления с учётом их типов. С др. стороны, полная масса скопления может быть определена по теореме о вириале (по дисперсии лучевых скоростей галактик в скоплении в предположении, что галактики скопления являются гравитационно связанными между собой). Подобные определения показывают, что полная масса скопления (её наз. *вириальной массой*) больше суммы масс отд. галактик скопления. Это свидетельствует о том, что в межгалактич. пространстве в скоплениях содержится много невидимой (скрытой) массы. Сверхскопление галактик с центром в созвездии Девы обладает суммарной массой  $\sim 10^{15} M_{\odot}$ .

Точность определения  $M$  н. т. зависит от точности определения всех величин, входящих в соответствующие формулы. Масса Земли найдена с погрешностью  $\approx 0,05\%$ , масса Луны — с погрешностью  $\approx 0,1\%$ . Погрешность определения массы Солнца также составляет  $\approx 0,1\%$ , она зависит от точности определения астр. единицы. Вообще, в значит. степени точность определения массы зависит от точности определения *расстояний шкалы*, а также расстояний между звездами (в случае двойных звезд), линейных размеров тел и т. д. Массы планет известны с погрешностью от 0,05 до 0,7%. Массы звезд определены с погрешностью  $\approx 20-60\%$ . Неуверенность определения массы галактик можно характеризовать коэф. 2, даже если надёжно определено расстояние до них.

Лит.: Сагитов М. У., Постоянная тяготения и масса Земли, М., 1989; Физика космоса. Маленькая энциклопедия, 2 изд., М., 1986; Кудряков с ия П. Г., Звездная астрономия, 2 изд., М., 1985; Клижич ия Н. А., Открытие Вселенной, М., 1987.

**МАССШТАБ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ** — отношение линейного размера *изображения оптического* к линейному размеру предмета. Служит характеристикой проекционных систем и определяется их линейным увеличением (см. *Увеличение оптическое*). Выбор  $M$  о. и. диктуется размерами изображаемого объекта: у телескопа, фотоаппарата, глаза  $M$  о. и. меньше единицы (у телескопа  $M$  о. и. практически равен нулю), у микроскопов (оптических и электронных), кино- и диапробекторов, фотоувеличителей — большие единицы. Если изображение получается с помощью неск. последоват. проекций, его  $M$  о. и. определяется произведением  $M$  о. и. каждой проекции в отдельности.

**МАССШТАБНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ** (скейлинг) — свойство неизменности ур-ний, описывающих нек-рую физ. теорию или к-л. физ. процесс, при изменении всех расстояний и промежутков времени в одинаковое число раз. Такие изменения образуют группу  $n$  и с т а б л и ч е с к и х п р е о б р а з о в а н и й (называемых также преобразованиями подобия), определяемую след. законом изменения координат пространства  $x$  и времени:

$$x \rightarrow \rho x, \quad y \rightarrow \rho y, \quad z \rightarrow \rho z, \quad t \rightarrow \rho t,$$

где  $\rho > 0$  — числовой параметр преобразования, к-рый при  $\rho > 1$  соответствует одностороннему растяжению, а при  $\rho < 1$  — одностороннему сжатию пространств-времени в  $\rho$  раз. В релятивистской теории масштабное преобразование вместе с 10 преобразованиями группы Пуанкаре (см. *Пространственно-временная симметрия*) образует т. н. группу Вейля  $W$ . Физ. величины изменяются при масштабном преобразовании в соответствии со своими размерностями, напр. вектор-потенциал эл.-маг. поля и ток преобразуются по законам  $A \rightarrow \rho^{-1} A$ ,  $j \rightarrow \rho^{-2} j$ . Безразмерные величины,

а также такие величины, как массы частиц, при масштабном преобразовании не меняются.

М. и. (иногда наз. также подобием или автомодельностью по аналогии с теорией фазовых переходов 2-го рода и гидродинамикой) обладает ряд ур-ний фаз. теорией. Это происходит в тех случаях, когда в решении ур-ний не входит массы или другие размерные параметры, не меняющиеся при масштабном преобразовании. В классич. физике важным примером являются *Максвелла уравнения*, к-рые обладают М. и. для любых расстояний и промежутков времени. *Кейна — Гордона уравнение* и *Дирака уравнение* масштабно инвариантны для расстояний, малых по сравнению с комптоновской длиной волны соответствующих частиц, и промежутков времени, малых по сравнению с этой длиной, делённой на скорость света. Для расстояний, сравнимых с комптоновской длиной волны (и соответствующих промежутков времени), М. и. нарушается из-за наличия масс частиц. О такой ситуации говорят как о *нарушенной* М. и.

В физике элементарных частиц нарушения М. и. обнаружена в поведении *структурных функций*, описывающих эксперименты по *глубоко неупругим процессам* рассеяния лептонов на адронах при высокой энергии. Для глубоко неупругого электрон-протонного рассеяния  $e + p \rightarrow e + X$  (где X обозначает совокупность адронов в конечном состоянии) при произвольных значениях энергии налетающего электрона следует ожидать зависимости структурных ф-ций по отдельности от двух имеющихся в задаче кинематич. переменных:  $q^2 =$  квадрата 4-импульса  $q$ , передаваемого от электрона к протону, и  $M_x^2 = (q + p)^2 =$  квадрата энергии образующейся адронной системы X в системе ед центра инерции; здесь  $p = 4$ -импульс ядра протона. Однако на ускорителе СЛАК в 1968 было впервые обнаружено, что при больших отрицат. значениях  $q^2 > 1$  (ГэВ/c)<sup>2</sup> структурные ф-ции зависят только от одного безразмерного отношения  $-q^2/M_p^2$ , а не от  $q^2$  и  $M_x^2$  по отдельности. Такое поведение структурных функций было теоретич. предсказано также в 1968 Дж. Бьёркеном (J. Bjorken) (с кейли и г Бьёркена). Скейлинг Бьёркена нашёл естеств. объяснение в рамках партонной модели адронов (см. *Партоны*).

Аналогично глубоко неупругим процессам М. и. наблюдается и в адрон-адронных столкновениях при высоких энергиях. Так, для адронных *инклюзивных процессов* распределения по продольному импульсу оказываются ф-циями только от безразмерного отношения  $x = p_L/P$  (здесь  $p_L > 1$  ГэВ/c — проекция импульса вторичной частицы в системе центра инерции на ось соударения, а P — импульс налетающей частицы в той же системе) и не зависят явным образом от энергии [т. е. скейлинг Фейнмана (R. Feynman, 1969)]. Раннее эксперим. указание на такое поведение инклюзивных процессов было получено в космич. лучах и впервые надёжно установлено на ускорителе ИФВЭ (Серпухов, 1968). Скейлинг Фейнмана объясняется на основе партонной модели.

От энергии сдвигивающихся частиц оказывается практически не зависящим также распределение по числу частиц, образующихся в *множественном процессе*. В этом случае вероятность рождения  $n$  частиц пропорциональна ф-ции лишь от отношения  $n/(n)$ , где  $(n)$  — ср. *множественность* при данной энергии. Такое свойство водобий получило назв. *скейлинг КНО* [Кобы — Нильсена — Олесена (Z. Koba, H. B. Nielsen, P. Olesen, 1972)]. В отличие от скейлингов Бьёркена и Фейнмана, наблюдающихся в опыте КНО-скейлинг не имеет общепризнанного теоретич. объяснения.

М. и. может быть использована для предсказания поведения факторов адронов при больших передаваемых импульсах и определения *структурных функций* (см. *Кваркового счёта правила*).

В связи с попытками объяснить в рамках квантовой теории поля (КТП) скейлинг Бьёркена с нач. 1970-х гг. обсуждалась возможность того, что *Дайсона уравнения* в КТП допускают масштабно-инвариантное решение. Для перенормируемой КТП этот вопрос оказывается связанным с поведением *эффективного заряда* при  $-q^2 \rightarrow \infty$ , к-рое определяется видом т. в. ф-ции Гелл-Манна — Лоу (см. *Ренормализационная группа*). Для М. и. необходимо, чтобы эта ф-ция обращалась в нуль при нек-ром значении эфф. заряда. В этом случае при достаточно больших значениях  $-q^2$  эфф. заряд совпадает с положением нуля и ур-ния ренормализ. группы для вершинных частей обладают масштабно-инвариантными решениями, вообще говоря, с нек-рой *аномальной размерностью*. Такая ситуация реализуется также в теории *фазовых переходов* 2-го рода (с той, однако, разницей, что эта задача определена в трёхмерном пространстве, а не в четырёхмерном пространстве-времени и рассматривается ИК-, а не УФ-предел) (см. ниже).

Примеры М. и. с нетривиальными аномальными размерностями имеются в двумерном пространстве-времени (см. *Дуэмерные модели КТП*). Для перенормируемой КТП оказывается, что масштабно-инвариантные решения с необходимостью обладают инвариантностью относительно более общего коинформного преобразования, что даёт возможность использовать для их нахождения методы коинформной КТП (см. *Коинформная инвариантность в КТП*).

В *квантовой хромодинамике* (КХД) *асимптотическая свобода* приводит к тому, что ф-ция Гелл-Манна — Лоу обращается в нуль при нулевом значении эфф. заряда. В этом случае ур-ния ренормализ. группы дают для структурных ф-ций решение, к-рое является ф-цией не только от отношения  $-q^2/M_p^2$ , но также слабо (логарифмически) зависит непосредственно от  $-q^2$ . Скейлинг Бьёркена справедлив в КХД с той точностью, с какой этой дополнит. зависимостью от  $-q^2$  можно пренебречь. Такое нарушение скейлинга Бьёркена должно наблюдаться в экспериментах по изучению неупругих процессов в достаточно широком диапазоне изменения  $-q^2$ .

Лит.: Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Введенко в теории квантовых полей, 4 изд., М., 1984, гл. 9; Сагитбаева Р., Broken scale invariance in particle physics, «Phys. Repts», 1971, т. 1, С. р. 1; Никитин Ю. П., Розенталь И. Л., Теория множественных процессов, М., 1976; Джекин Р., Приближение масштабной инвариантности, в кн.: Трейман С., Джекин Р., Гросс Д., Ленци по алгебре токов, пер. С. Дж. Л., М., 1977, гл. 7; Ю. М. Максимова.

**Масштабная инвариантность в теории фазовых переходов 2-го рода.** Эти переходы развиваются на яск. классов эквивалентности, причём в рамках одного класса особенности термодинамик. величин в совершенно разл. системах описываются одними и теми же степенными законами. Так, напр., изотропные ферромагнетики, антиферромагнетики и сегнетоэлектрики попадают в один класс эквивалентности, а *критические точки жидкости* — пар, двухкомпонентные растворы, изинговский ферромагнетик — в другой.

При фазовом переходе 2-го рода происходит *спонтанное нарушение симметрии* — в низкотемпературной фазе оказывается отличным от нуля т. п. *параметр порядка* (вектор намагниченности в ферромагнетиках, вектор поляризации в сегнетоэлектриках и т. п.). При темп-рах, близких к точке фазового перехода  $T_c$ , параметр порядка сильно флуктуирует, причём характерный размер флуктуаций (корреляц. радиус  $r_c$ ) неограниченно растёт по мере приближения к  $T_c$ .

С матем. точки зрения задача описания критич. флуктуаций сводится к выяснению *корреляционных функций* типа  $(\varphi_1(x_1) \dots \varphi_n(x_n))$ ,  $(\varphi_1(x_1))$  — компонента параметра порядка,  $i = 1, \dots, n$ . В точке фазового перехода  $r_c$  бесконечен, а следовательно, отсутствует естеств. единица длины. Подобное изменение всех расстояний (масштабное преобразование) в отсутствие характерного размера не может изменить состояния системы,

т. к. это преобразование сводится к изменению единицы длины. При масштабном преобразовании сильно флуктуирующие величины преобразуются согласно закону

$$A(x) \rightarrow \lambda^d A(\lambda x), \quad (1)$$

где  $\lambda_d$  — критический показатель оператора  $A(x)$ . Существует бесконечный набор локальных неперидических операторов  $A_k(x)$ ,  $k$ -рые получаются из  $\varphi_1(x)$ , грубо говоря, «возведением в степень» и дифференцированием по координатам  $x$  и  $k$ -рые преобразуются при масштабном преобразовании в соответствии с законом (1). Критич. показатели  $\lambda_d$  зависят от размерности пространства  $d$ , от числа компонент  $n$  параметра порядка, от конкретного вида оператора  $A_k(x)$ , но не зависят от структуры вещества на межатомах расстояниях.

Неизменность равновесного распределения критич. флуктуаций при масштабном преобразовании приводит к след. тождествам Уорда для корреляц. ф-ций:

$$K^{A_1 \dots A_n}(x_1, \dots, x_n) = \langle A_1(x_1) \dots A_n(x_n) \rangle = \\ = \lambda^{\Delta_{A_1} + \dots + \Delta_{A_n}} K^{A_1 \dots A_n}(\lambda x_1, \dots, \lambda x_n). \quad (2)$$

Для важного случая парных корреляц. ф-ций тождества (2) в сочетании с соображениями инвариантности относительно трансляций и вращения полностью определяют вид этих ф-ций:

$$K^{A_1 A_2}(x_1 - x_2) = Z_{A_1 A_2} |x_1 - x_2|^{-(\Delta_{A_1} + \Delta_{A_2})},$$

где  $Z_{A_1 A_2}$  — константы. Парные корреляц. ф-ции в нек-рых случаях можно измерить экспериментально; напр., эксперименты по рассеянию света в критич. точке жидкость — нар позволяют получить информацию о парной корреляц. ф-ции плотности вещества.

Небольшое изменение темп-ры или включение слабого внеш. поля (магн. поля, давления и т. п.) выводит систему из точки фазового перехода. Корреляц. радиус становится конечным, хотя и превышает межмолекулярное расстояние  $a$ . Зависимость  $r_c$  от внеш. поля  $h$  и приведенной темп-ры  $\tau = (T - T_c)/T_c$  также определяется законами подобия. Если  $h = 0$ , а  $\tau \neq 0$ :

$$r_c(\tau) \sim |\tau|^{-\nu}, \quad \nu = (d - \Delta_\phi)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\Delta_\phi$  — критич. показатель оператора плотности энергии. Если  $\tau = 0$ , а  $h \neq 0$ :

$$r_c(h) \sim |h|^{-\mu}, \quad \mu = (d - \Delta_\phi)^{-1}. \quad (4)$$

Здесь  $\Delta_\phi$  — критич. показатель параметра порядка. Ясно, что поведение парных корреляц. ф-ций для расстояний  $a \ll |x_1 - x_2| \ll r_c$  будет таким же, как и в точке фазового перехода, а при  $|x_1 - x_2| \gg r_c$  корреляц. ф-ции экспоненциально убывают. Поэтому для сингулярной части теплоёмкости  $C$  получаем оценку:

$$C \sim [r_c(\tau, h)]^{d-2\Delta_\phi}. \quad (5)$$

Восприимчивость системы  $\chi$  определяется корреляц. ф-цией параметра порядка:

$$\chi \sim [r_c(\tau, h)]^{d-2\Delta_\phi}. \quad (6)$$

При  $T < T_c$  появляется отличное от нуля среднее  $\langle \varphi_1(x) \rangle = \varphi_0$ , причём вблизи точки перехода

$$\varphi_0 \sim [r_c(\tau, h)]^{-\Delta_\phi}. \quad (7)$$

Ф-лы (3)–(7) показывают, что поведение сингулярной части теплоёмкости, восприимчивости и параметра порядка вблизи  $T_c$  в случаях, когда либо  $\tau$ , либо  $h$  равны нулю, определяется двумя критич. индексами  $\Delta_\phi$  и  $\Delta_\phi'$ . Критич. индексы  $\Delta_\phi$ ,  $\Delta_\phi'$  и т. п. приближённо вычислены методом эшелон-разложения.

Лит.: Паганиский И. А. З. Покровский В. Л., Флуктуационная теория фазовых переходов, 2 изд., М., 1982;

Вильсон К. К. Когут Д. Ж., Ренормализационная группа и  $\epsilon$ -разложение, пер. с англ., М., 1975. С. В. Хохаичев, МАСШТАБНЫЙ ФАКТОР (фактор расширения) — в релятивистской космологии величина  $R(t)$ , показывающая, как с течением времени  $t$  меняется расстояние между фиксиров. частицами в деформирующейся (расширяющейся) Вселенной. В однородных изотропных моделях Вселенной (см. Космологические модели) элемент 4-мерного интервала  $s$  может быть записан в виде  $ds^2 = c^2 dt^2 - d\vec{x}^2$ , где квадрат элемента длины

$$d\vec{x}^2 = R^2(t) \gamma_{ik}(x^i) dx^i dx^k. \quad (1)$$

Здесь  $x^i$  — пространственные координаты; индексы  $i, k, l$  пробегуют значения 1, 2, 3; по дважды встречающимся индексам осуществляется суммирование;  $\gamma_{ik}(x^i)$  — пространственный метрический тензор, описывающий геометрию однородного изотропного 3-мерного пространства. Ф-ция  $R(t)$  определена с точностью до пост. множителя. Обычно в космол. моделях с отличной от нуля кривизной пространства величину  $R(t)$  выбирают равной модулю радиуса кривизны 3-мерного пространства для любого фиксиров. момента времени, в этом случае  $x^i$  — безразмерные пространственные координаты. О поведении  $R(t)$  как ф-ции времени см. в ст. Космология. В анизотропных однородных космологиях, моделях деформация среды может зависеть от направления, и тогда М. ф., вообще говоря, разлагается вдоль разных пространственных осей координат. В случае анизотропного расширения Вселенной величина

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \equiv H(t) \quad (2)$$

характеризует скорость относ. изменения линейных масштабов в сопутствующей системе отсчёта. Параметр  $H(t)$  наз. постоянной Хаббла (см. Хаббла закон). Соотношение (2) показывает, что расширение Вселенной отвечает значению  $H(t) > 0$ . Ф-ции  $R(t)$  и  $H(t)$  описывают эволюцию Вселенной. Эти ф-ции определяются из решений космологич. ур-ний и данных астр. наблюдений.

Лит.: Зельдович И. В., Новиков И. Д., Строение и эволюция Вселенной, М., 1975; Мизерс Ч., Торн К., Уилер Д. Ж., Гравитация, пер. с англ., т. 2, М., 1977. И. Д. Новиков.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЯТНИК** — см. Математическое ОЖИДАНИЕ (среднее значение) случайной величины — числовая характеристика случайной величины. Если  $X = X(\omega)$  — случайная величина, заданная на вероятностном пространстве  $(\Omega, F, P)$  (см. Вероятностей теория), то её М. о.  $MX$  (или  $EX$ ) определяется как интеграл Лебега:

$$MX = \int_{\Omega} X(\omega) P(d\omega) = \int_R x P_X(dx),$$

где  $P_X(-\infty, x) = P(X < x)$  — распределение вероятностей величины  $X$ ,  $R$  — множество значений  $X$ . Если распределение  $X$  дискретно  $[P(X = x_i) = p_i, \sum p_i = 1]$  или имеет непрерывное распределение с плотностью вероятности  $f(x)$ , то соответственно

$$MX = \sum_i x_i p_i \quad \text{или} \quad MX = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx.$$

Аналогично определяют М. о. и для случайных величин со значениями в векторных пространствах.

Операция вычисления М. о. линейна и монотонна, для неслучайной величины  $X$  получим  $MX = X$ . Если величины  $X$  и  $Y$  независимы, то  $MX Y = M X \times M Y$ . Существование у случайной величины  $X$  М. о. равносильно тому, что ср. арифметических значения в длинном ряду  $X_1, X_2, \dots$  независимых реализаций  $X$  стремятся к определённой неслучайной величине:  $n^{-1}(X_1 + \dots + X_n) \rightarrow MX$  при  $n \rightarrow \infty$  с вероятностью 1 (большинств закон).

С помощью математического ожидания определяют многие важные характеристики случайной величины, напр. моменты (в т. ч. дисперсию), характеристическую функцию.

Лит.: Федер В., Введение в теорию вероятностей и ее приложения, пер. с англ., 14 изд., т. 1—2, М., 1984.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ФИЗИКИ УРАВНЕНИЕ** — ур-ние, описывающее матем. модели физ. явлений. Теория этих моделей (математическая физика) занимает промежуточное положение между физикой и математикой. При построении моделей используются физ. законы, однако методы исследования полученных ур-ний являются математическими. В понятие методов математической физики включают те математические методы, к-рые применяют для построения и изучения моделей, описывающих широкие классы физических явлений.

Методы матем. физики начали разрабатываться в трудах И. Ньютона (I. Newton) по созданию основ классич. механики, всемирного тяготения, теории света. Дальнейшее их развитие и применение к изучению матем. моделей разл. физ. явлений связано с именами Ж. Л. Лагранжа (J. L. Lagrange), Л. Эйлера (L. Euler), Ж. Фурье (J. Fourier), К. Ф. Гаусса (C. F. Gauß), Б. Римана (B. Riemann), М. В. Остроградского, А. М. Ляпунова, В. А. Стеклова.

Методы матем. физики применяли для изучения физ. явлений, связанных с разл. полями и волновыми процессами в электродинамике, акустике, теории упругости, гидро- и аэродинамике, теории тепла и диффузии и ряде др. исследований физ. явлений и сплошных сред. Матем. модели этих явлений обычно описывают при помощи дифференц. ур-ний с частными производными, получивших название М. ф. у.

Помимо дифференц. ур-ний при описании матем. моделей физики применяют интегральные и интегрально-дифференц. ур-ния, вариационные и теоретико-вероятностные методы, теорию потенциала, методы теории аналогич. ф-ций и др. разделы математики. Особое значение для исследования матем. моделей физики приобретают новые численные методы, использующие ЭВМ, что позволило эффективно решать сложные задачи газовой динамики, теории переноса, физики плазмы.

Теоретич. исследования в области квантовой физики потребовали расширения используемых матем. методов. Стала применять теорию операторов, теорию обобщенных ф-ций, топологию и алгебраич. методы. Интенсивное взаимодействие теоретич. физики, математики и использования ЭВМ в науч. исследованиях привело к расширению тематики, созданию новых классов моделей.

Постановка задач матем. физики заключается в построении матем. моделей, описывающих осн. закономерности изучаемого класса физ. явлений. Такая постановка состоит в выводе ур-ний (дифференц., интегральных, интегро-дифференц. или алгебраич.еских), к-рым удовлетворяют величины, характеризующие физ. процесс. При этом исходят из осн. физ. законов, учитывающих только наиб. существ. черты явления, отвлекаясь от второстепенных характеристик. Такими законами являются обычно законы сохранения, напр., кол-ва движения, энергии, числа частиц и т. д. Поэтому для описания процессов разл. физ. природы, но имеющих общие характерные черты, применимы одни и те же матем. модели.

Крайне важно. Для полного описания эволюции физ. процесса помимо ур-ний необходимо, во-первых, задать картину процесса в нек-рых фиксиров. момент времени (начальные условия) и, во-вторых, задать режим на границе той среды, где протекает этот процесс (границные условия). Начальные и граничные условия образуют краевые условия, а дифференц. ур-ние вместе с соответствующими краевыми условиями — краевую задачу матем. физики.

Большинство М. ф. у. — линейные дифференц. ур-ния с частными производными 2-го порядка:

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} + \Phi(x, u, \text{grad } u) = 0,$$

$$x = (x_1, \dots, x_n),$$

с кусочно-непрерывными коэф.  $a_{ij}(x)$ . Заменой переменных квадратичную форму  $\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) p_i p_j$  можно привести

к канонич. виду  $\sum_{i=1}^r \sigma_i^2 q_i^2 - \sum_{i=r+1}^m q_i^2$ ,  $m \leq n$ , причём числа  $r$  и  $m$  не зависят от преобразования. Если  $m = n$  и все слагаемые одного знака ( $r = 0$  или  $r = m$ ), то ур-ние относится к эллиптическому у типу. Если  $m = n$ , но имеются слагаемые разных знаков, исследуемое ур-ние — гиперболического типа. При  $m < n$  — ур-ние параболического типа. Эта классификация, вообще говоря, зависит от точки  $x$ . Ниже приведены нек-рые примеры ур-ний и соответствующих краевых задач.

Ур-ние

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \text{div}(p \text{ grad } u) - qu + f(x, t) \quad (1)$$

описывает малые колебания струн, стержней, мембран, акустич. и эл.-магн. колебания. В ур-нии (1) пространственные переменные  $x = (x_1, \dots, x_n)$  изменяются в области  $G \subset R^n$ ,  $n = 1, 2, 3$ , где задана исследуемая физ. процесс; при этом должно быть  $\rho > 0$ ,  $p > 0$  и  $q \geq 0$ . При этих условиях ур-ние (1) — ур-ние гиперболич. типа. При  $\rho = 1$ ,  $p = a^2 = \text{const}$  и  $q = 0$  ур-ние (1) превращается в волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \Delta u + f(x, t), \quad (2)$$

где  $\Delta$  — оператор Лапласа.

Диффузионное уравнение

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(p \text{ grad } u) - qu + f(x, t) \quad (3)$$

описывает процессы диффузии частиц и распространения тепла в среде. Ур-ние (3) — ур-ние параболич. типа. При  $\rho = 1$ ,  $p = a^2 = \text{const}$  и  $q = 0$  ур-ние (3) превращается в уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \Delta u + f(x, t). \quad (4)$$

Для стационарных процессов, когда отсутствует зависимость от времени  $t$ , ур-ния (1) и (3) принимают вид

$$-\text{div}(p \text{ grad } u) + qu = f(x). \quad (5)$$

Ур-ние (5) — ур-ние эллиптич. типа. При  $p = 1$  и  $q = 0$  ур-ние (5) наз. ур-нием Пуассона

$$\Delta u = -f(x), \quad (6)$$

а при  $f = 0$  — Лапласа уравнением

$$\Delta u = 0. \quad (7)$$

Ур-ниями (6) и (7) удовлетворяют разл. потенциалы: ньютонов (кулонов) потенциал, потенциал течения несжимаемой жидкости и т. д.

Если в волновом ур-нии (2) внеш. возмущение  $f$  — периодическое с частотой  $\omega$ ,  $f(x, t) = a^2 f(x) \exp(i\omega t)$ , то амплитуда  $u(x)$  периодич. решения с той же частотой  $\omega$

$$u(x, t) = u(x) \exp(i\omega t)$$

удовлетворяет Гельмгольца уравнению

$$\Delta u + k^2 u = -f(x), \quad k^2 = \frac{\omega^2}{a^2}. \quad (8)$$

К ур-нию Гельмгольца приводят задачи дифракции.

Для полного описания процесса колебаний необходимо задать нач. возмущение и нач. скорость

$$u|_{t=0} = u_0(x), \quad \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0} = u_1(x), \quad (9)$$

а для процесса диффузии — только нач. возмущение

$$u|_{t=0} = u_0(x). \quad (10)$$

Кроме того, на границе  $S$  области  $G$  необходимо удовлетворить заданному решению. В простейших случаях граничные условия для у-ний (1), (3), (5) описываются соотношением

$$k \frac{\partial u}{\partial n} + hu|_S = v(x, t), \quad t > 0, \quad (11)$$

где  $k$  и  $h$  — заданные неотрицательные ф-ции, не обращающиеся в нуль одновременно,  $n$  — внеш. нормаль к поверхности  $S$ ,  $v$  — заданная ф-ция. В случае неогранич. областей, напр. внешности огранич. области, кроме условия на границе задают также условие на бесконечности. Напр., для у-ния Гельмгольца (8) на бесконечности задают *Зоммерфельда условия излучения*.

Краевая задача, к-рая содержит только нач. условия (и, стало быть, не содержит граничных условий), так что область  $G$  — всё пространство  $R^n$ , наз. *Коши задачей*. Для у-ния (1) задача Коши (1), (9) ставится след. образом: найти ф-цию  $u(x, t)$ , удовлетворяющую у-нию (1) при  $t > 0$  и нач. условиям (9) на плоскости  $t = 0$ . Аналогично ставится и задача Коши (3), (10) для у-ния диффузии (3).

Если в краевой задаче присутствуют и нач., и граничные условия, то такая задача наз. смешанной задачей. Для у-ния (1) смешанная задача (1), (9), (11) ставится так: найти ф-цию  $u(x, t)$ , удовлетворяющую у-нию (1) в цилиндре  $G \times (0, \infty)$ , нач. условиям (9) на его гнз. основании  $G$  и граничному условию (11) на его боковой поверхности  $S \times [0, \infty)$ . Аналогично ставится смешанная задача (3), (10), (11) для у-ния диффузии (3). Существуют и др. постановки краевых задач.

Для стационарного у-ния (5) нач. условия отсутствуют и соответствующая краевая задача ставится так: найти ф-цию  $u(x)$ , удовлетворяющую у-нию (5) в области  $G$  и граничному условию на границе  $S$  области  $G$ :

$$k \frac{\partial u}{\partial n} + hu|_S = v(x). \quad (11')$$

Для у-ния (5) краевая задача с граничным условием  $u|_S = v_0(x)$  наз. *Дирихле задачей*, а с граничным условием  $\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_S = v_1(x)$  — *Неймана задачей*. Различают внеш. и внутр. краевые задачи Дирихле и Неймана. Для внеш. задач кроме граничных условий необходимо задавать условия на бесконечности.

К краевым задачам для у-ния (5) относятся также задачи на собств. значения: найти те значения параметра  $\lambda$  (собств. значения), при к-рых однородное у-ние

$$Lu = -\operatorname{div}(p \operatorname{grad} u) + qu = \lambda ru \quad (12)$$

имеет нетривиальные решения (собств. ф-ции), удовлетворяющие однородному граничному условию

$$k \frac{\partial u}{\partial n} + hu|_S = 0. \quad (13)$$

Если  $G$  — огранич. область с достаточно гладкой границей  $S$ , то существует счётное число неотрицательных собств. значений  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$  задачи (12), (13) ( $0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots, \lambda \rightarrow \infty$ ), каждое  $\lambda_k$  — конечной кратности; соответствующие собств. ф-ции  $u_k(x)$ ,  $Lu_k = \lambda_k u_k$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , образуют полную ортонормированную систему ф-ций; при этом всякая ф-ция, удовлетворяющая граничному условию (13), разлагается в регулярно сходящийся ряд Фурье по системе собств. ф-ций  $\{u_k\}$ .

**Обобщённые задачи.** Иллюстрированные постановки краевых задач предполагают достаточную гладкость решения внутри области вплоть до границы. Такие постановки краевых задач наз. классическими. Однако во мн. физ. задачах приходится отказываться от требования гладкости. Внутри области решение может быть *обобщённой функцией* и удовлетворять у-рию в смысле обобщённых ф-ций, краевые условия могут удовлетворяться в к.-л. обобщённом смысле. Такие краевые задачи наз. обобщёнными. Напр., обобщённая задача Коши для волнового у-ния ставится след. образом. Пусть  $u$  — классич. решение задачи Коши (2), (9). Ф-ции  $\tilde{u}$  и  $\tilde{f}$  продолжим нулём на  $t < 0$  и обозначим их  $\tilde{u}$  и  $\tilde{f}$  соответственно. Тогда ф-ция  $\tilde{u}$  будет удовлетворять в смысле обобщённых ф-ций во всём пространстве  $R^{n+1}$  волновому у-нию

$$\Delta \tilde{u} / \partial t^2 = a^2 \Delta \tilde{u} + u_0(x) \cdot \delta'(t) + u_1(x) \cdot \delta(t) + \tilde{f}(x, t). \quad (14)$$

При этом нач. возмущения  $u_0$  и  $u_1$  играют роль мгновенного действующих внеш. источников типа двойного слоя,  $u_0(x) \cdot \delta'(t)$ , и простого слоя,  $u_1(x) \cdot \delta(t)$ . Сказанное позволяет в нек-ром смысле определить обобщённую задачу Коши для волнового у-ния с источником  $F$  (обобщённая ф-ция  $F = 0$  при  $t < 0$ ) наз. задачей об отыскании тех обобщённых решений  $u(x, t)$  в  $R^{n+1}$  волнового у-ния

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \Delta u + F(x, t), \quad (14')$$

к-рые обращаются в нуль при  $t < 0$ . Аналогично ставится обобщённая задача Коши и для у-ния теплопроводности (4).

Поскольку краевые задачи матем. физики описывают реальные физ. процессы, то они должны удовлетворять след. естеств. требованиям, сформулированным Ж. Адамаром (J. Hadamard): 1) решение должно существовать в нек-ром классе ф-ций  $M_1$ ; 2) решение должно быть единственным, возможно в др. классе ф-ций  $M_2$ ; 3) решение должно непрерывно зависеть от данных задачи (нач. и граничных данных, свободных членов, коэф. у-ния и т. д.). Требование непрерывной зависимости решения возникает в связи с тем, что данные физ. задачи, как правило, определяют из эксперимента приблизительно, поэтому необходимо быть уверенным в том, что решение задачи не будет существенно зависеть от погрешностей измерений.

Задача, удовлетворяющая перечисленным требованиям 1—3, наз. корректной постановкой задачи. Хотя требования 1—3, на первый взгляд, кажутся естественными, их тем не менее необходимо доказывать в рамках принятой матем. модели. Доказательство корректности — первая проверка матем. модели: модель непротиворечива, не содержит паразитных решений и мало чувствительна к погрешностям измерений.

Нахождение корректных постановок краевых задач матем. физики и методов построения их решений (точных или приближённых) и составляет одно из главных содержаний предмета М. ф. у. Известно, что все перечисленные выше краевые задачи поставлены корректно.

Задача, не удовлетворяющая хотя бы одному из условий 1—3, наз. некорректной задачей. Некорректные задачи приобретают в математической физике всё возрастающее значение: к ним в первую очередь относятся обратные задачи, а также задачи, связанные с обработкой и интерпретацией результатов наблюдений.

Важную роль в М. ф. у. играет понятие *Грина функции*. Ф-цией Грина линейной дифференциальной оператором

$$L(x, t; D) = \sum_{\alpha} a_{\alpha}(x, t) D^{\alpha}, \quad D = \left( \frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}, \frac{\partial}{\partial t} \right)$$

с заданными (однородными) краевыми условиями на границе области изменения переменных  $(x, t)$  из ф-ции  $G(x, t; \xi, \tau)$ , удовлетворяющая при каждом  $(\xi, \tau)$  из этой области ур-нию

$$L(x, t; D)G(x, t; \xi, \tau) = \delta(x - \xi, t - \tau). \quad (15)$$

В физ. ситуациях ф-ция Грина  $G(x, t; \xi, \tau)$  описывает возмущение от точечного (в точке  $\xi$ ) мгновенного (в момент  $\tau$ ) источника единичной интенсивности (с учётом неоднородности среды и краевого эффекта). В случае постоянных коэф. и отсутствия границы ф-ция Грина при  $\xi = 0$  и  $\tau = 0$  равна ф. фундам. е-та л-м решением и обозначается  $E(x, t)$ :

$$L(D)E(x, t) = \delta(x, t). \quad (15')$$

Доказано существование фундам. решения для любого оператора  $L(D) \neq 0$ .

С помощью фундам. решения  $E(x, t)$  решение  $u(x, t)$  ур-ния

$$L(D)u = F(x, t) \quad (16)$$

с произвольной правой частью  $F$  (обобщённая ф-ция) выражается во всём пространстве  $R^{n+1}$  свёрткой

$$u = F * E = \int F(\xi, \tau) E(x - \xi, t - \tau) d\xi d\tau.$$

В этом состоит сущность метода точечного источника решения линейных задач матем. физики.

**Методы решения.** Для исследования и приближённого решения смешанных задач используют *разделение переменных метод* (метод Фурье) при условии, что коэф. в ур-нии и в граничных условиях не зависят от времени  $t$ . Идея метода, напр. применительно к задачам (3), (10), (13), состоит в следующем: искомое решение  $u(x, t)$  и правую часть  $f(x, t)$  разлагают в ряд Фурье по собств. ф-циям  $\{u_k\}$  краевой задачи (12), (13):

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k(t) u_k(x), \quad f(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k(t) u_k(x). \quad (17)$$

Подставляя эти ряды в ур-ние (3), для неизвестных ф-ций  $b_k(t)$  получают ур-ние

$$\dot{b}_k(t) + \lambda_k b_k(t) = c_k(t), \quad k = 1, 2, \dots \quad (18)$$

При этом, чтобы ряд (17) для  $u$  удовлетворял нач. условию (10), необходимо положить

$$b_k(0) = \int_0^l \rho(x) u_0(x) u_k(x) dx = a_k. \quad (19)$$

Решая задачу Коши (18), (19), получают формальное решение задачи (3), (10), (13) в виде ряда

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ a_k e^{-\lambda_k t} + \int_0^t e^{-\lambda_k(t-\tau)} c_k(\tau) d\tau \right] u_k(x). \quad (20)$$

Возникает задача обоснования метода Фурье: когда формальный ряд (20) даёт классич. или обобщённое решение задачи (3), (10), (13)? Аналогично метод Фурье применяют и к смешанной задаче (1), (9), (13).

Метод разделения переменных находит применение также и для решения краевых задач для ур-ния эллиптического типа (5). При исследовании и приближённом решении краевых задач для ур-ний (5) используют вариационный метод. Так, напр. для задачи на собств. значения (12), (13) (при  $p=1$ ) собств. значения  $\lambda_k$  удовлетворяют вариацион. принципу:

$$\lambda_k = \inf (Lu, u) / (u, u), \quad (21)$$

$$(u, u) = 0; \quad i = 1, \dots, k - 1$$

где ф-ции сравнения  $u$  и  $u$  удовлетворяют (13); при этом  $\inf$  в (21) реализуется на любой собств. ф-ции, соответствующей собств. значению  $\lambda_k$ , и только на ней.

Перечисленные краевые задачи не исчерпывают всё многообразие краевых задач матем. физики, это простейшие классич. примеры краевых задач. Краевые задачи, описывающие реальные физ. процессы, могут быть сложными: системы ур-ний, ур-ния высших порядков, нелинейные ур-ния. К ним в первую очередь относятся ур-ние Шредингера, ур-ния гидродинамики, переноса, магн. гидродинамики, ур-ния Максвелла, теории упругости, ур-ния Дирака, ур-ния Гильберта — Эйзенштейна, ур-ния Янга — Миллса и др. В связи с поисками нетривиальных моделей, описывающих взаимодействие квантовых полей, возрос интерес к классич. нелинейным ур-ниям (см. *Нелинейные уравнения математической физики*).

Лит.: Тихонов А. И., Самарский А. А., Уравнения математической физики, 3 изд., М., 1977; Курат Р., Уравнения с частными производными, пер. с англ., М., 1964; В. А. Димитров В. С., Уравнения математической физики, 3 изд., М., 1988; с-го же, Обобщённые функции в математической физике, 3 изд., М., 1979; Дядкин С. И., О. А., Краевые задачи математической физики, М., 1973; Тихонов А. Н., Арсенив В. Я., Методы решения некорректных задач, 3 изд., М., 1986; Миллс Л. Д., Дифференциальные уравнения в частных производных, 2 изд., М., 1983; Рид М., Саймон В. М., Методы современной математической физики, пер. с англ., т. 1—4, М., 1977—82; Адамар Ж., Задача Коши для линейных уравнений с частными производными гиперболического типа, пер. с франц., М., 1978; Риктмайер Р., Принципы современной математической физики, пер. с англ., т. 2, М., 1984. В. С. Володимиров.

**МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА** — понятие, вводимое в механике для объекта бесконечно малых размеров, имеющего массу. Положение М. т. в пространстве определяется как положение геом. точки, что существенно упрощает решение задач механики. Практически всякое тело можно рассматривать как М. т. в случаях, когда расстояния, проходящие точками тела, очень велики по сравнению с его размерами. Кроме того, при изучении движения любой механич. системы (в частности, и твёрдого тела) закон движения её центра масс (центра тяжести) находится как закон движения М. т., имеющей массу, равную массе системы, и находящейся под действием всех внеш. сил, приложенных к системе.

**МАТЕРИЯ И ДВИЖЕНИЕ** — философские категории, являющиеся мировоззренческими основаниями науки в рамках материалистич. философских учений. С точки зрения материалистич. диалектики, материальное единство мира, представляющего собой движущуюся материю, служит философским основанием единства системы естественных и технических наук. Каждая из этих наук по-своему конкретизирует материалистич. представления о М. и др., разрабатывая специфич. модели структуры, движения и взаимодействия разл. материальных образований, служащих объектами их изучения, в соответствии с уровнем развития обществ.-историч. практики, являющейся критерием истины, основой и целью познания.

Согласно материалистич. диалектике, материя — это объективная реальность, давая нам в ощущениях. Движение, понимаемое как изменение вообще, — способ существования материи — нет движения без материи, как нет и материи без движения. Материальный мир рассматривается как сложная многоуровневая развивающаяся система взаимосвязанных материальных образований, каждое из к-рых, как и весь материальный мир в целом, воплощает в себе единство устойчивости и изменчивости, дискретности и непрерывности и др. диалектич. противоположностей. Субординация и координация материальных образований в рамках всеобщей связи объектов и явлений описывается с помощью представлений о разл. структурных уровнях, формах движения и видах материи, конкретизируемых соответствующими частными науками. Всеобщими формами существования материи являются *пространство и время*, выражающие соответственно порядок сосуществования и смены отд. материальных образований и их состояний.

Конкретные науч. представления о М. и д. меняются по мере развития обществ.-историч. практики. В физике это изменение выражается в виде смены физ. картин мира. При этом единственное „свойство“ материи, с названием которого связан философский материализм, — свойство быть объективной реальностью — остаётся неизменным, обеспечивая единство и преемственность развития науч. знания.

Будучи лидером естествознания как системы наук о природе, физика вносила и продолжает вносить определяющий вклад в представления о М. и д., лежащие в основе др. естеств.-науч. дисциплин (химии, биологии, геологии и т. п.) и получающие в них дальнейшую конкретизацию и развитие.

В физической и вообще научной, в т. ч. философской, литературе (особенно зарубежной) термин «материя» до сих пор нередко продолжает употребляться в нефилософском смысле, обозначая *вещество*, к-рое с диалектико-материалистич. точки зрения является лишь одним из видов материи, не исчерпывая собой всего их многообразия. Нефилософский смысл часто вкладывается в естеств.-науч. литературу и в термин «движение», понимаемое тогда только как изменение положения в пространстве с течением времени, т. е. только как механич. движение. Такого рода словоупотребление, хотя и является нестрогим, прочно вошло в языковую практику и обычно не вызывает недоразумений. Однако если философский смысл понятий М. и д. отожествляется с конкретно-науч. представлениями о них, то это может послужить одним из источников кризисов философских оснований науки, неоднократно имевших место на протяжении её истории.

Историческое развитие физических представлений о материи и движении. Первые теоретич. представления о М. и д., ставшие впоследствии в европ. культурном регионе основой физики как фундам. науки о природе, были разработаны в рамках античных натурфилософских учений. Все эти учения трактовали материю как первоэлементарн. общий субстрат всех природных образований. Начав с конкретных представлений о материи как субстанциальном первоначале всех вещей [вода у Фалеса (Θαλῆς), воздух у Анаксимена (Ἀναξίμανης), огонь у Гераклида (Ἡρακλείδης)], сохраняя своё тождество в многообразных процессах изменения природных явлений, др.-греч. философия вскоре выработала представление о качестве неопределимой первичной материи (αἰθέριον Ἀναξίμανδρα), опред. модификациями к-рого были античные виды материи — вода, земля, воздух и огонь. Движение, рассматривавшееся как изменение вообще, первоначально трактовалось наивно-антропоморфно — как проявление одушевлённости отд. вещей и мира в целом — Космоса (γίγναισιν).

Наиб. развитые философско-физ. представления о М. и д. античности, категориальная основами к-рых не утратили своего значения и по сей день, были развиты в учениях Демокрита (Δημόκριτος), Платона (Πλάτων) и Аристотеля (Ἀριστοτέλης). Демокрит всесторонне разработал атомистич. принципы учения о М. и д., согласно к-рым всё многообразие природных вещей и процессов сводилось к разл. сочетаниям и пространственным перемещениям внутреннебескачеств. непроницаемых и неделимых первоэлементов материи — атомов, различающихся между собой лишь пространственными размерами, формой и ориентацией. Материя, как состоящая в конечном счёте из атомов, имела, т. о., предел структурной делимости, а все виды движения сводились к одному — механическому.

В натурфилософской части своего учения (диалог «Тимей») Платон излагает доктрину своеобразного «матем. атомазма». Четыре античных вида материи образуются у него в результате первонач. оформления бескачеств. «бездвидной» первоэлемента (отождествляемой с пространством, или небытием) посредством двух видов прямоугольных треугольников с соотношениями сторон 1:√3:2 и 1:1:√2, на к-рых затем строятся пра-

вильные многогранники: тетраэдр — элементарная частица для огня, октаэдр — для воздуха, икосаэдр — для воды и куб — для земли. В. Гейзенберг (W. Heisenberg) рассматривал геом. атомизм Платона как преобраз совр. физ. представлений о симметрии.

В учении Аристотеля бескачеств. первоэлемента, обладающая неопределённым бытием, первоначально оформляется в землю, воду, воздух и огонь путём попарных сочетаний четырёх осн. качеств — тёплого, холодного, влажного и сухого. Аристотель также выделял четыре типа движения: по сути — возмещение и уничтожение, по кол-ву — рост и уменьшение, по качеству — превращение и по месту — перемещение, определил движение вообще как переход из возможности в действительность, и четыре типа причин, ответственных за существование отд. материальных образований (сущностей), — материальную, формальную, действующую и целевую. Он впервые ввёл в натурфилософский обиход сам термин материя и отделил физику как один из разделов второй философии от собственно философии (метафизики).

Атомизм Демокрита, развитый Эпикуром (Ἐπίκουρος), был возрождён в новое время П. Гассенди (P. Gassendi). Достижения Г. Галлея (G. Galilei) и его современников [И. Кеплер (J. Kepler), П. Декарт (R. Descartes)] в области физ. учения о М. и д. подготовили почву для работ И. Ньютона (I. Newton), начавшего оформление предмета механики в целостную систему понятий, к-рая была положена в основу механистич. картины мира. В её рамках материя рассматривалась исключительно как вещество — протяжённая непроницаемая инертная весомая субстанция, единств. видом движения к-рой было пространственное перемещение. Мерой кол-ва материи была *масса*, служившая одновременно мерой инертности — способности материальных тел сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, к-рое могло быть изменено только в результате воздействия веш. причин — сил. По вопросу о структуре материи в рамках механистич. картины мира конструировали концепции дискретности (разл. варианты атомизма) и непрерывности, по вопросу о характере силового взаимодействия между материальными телами, вызвавшего или изменявшего их движение — концепции близкого действия и дальнего действия. В первой из них сила была результатом движения, возникая при соударении непроницаемых движущихся тел, во второй — внутр. свойством материи, первичным по отношению к движению, порождаемому ею (противоположность кинетизма и динамизма). В качестве меры движения фигурировали две величины — кол-во движения (импульс) и «живая сила» (кинетич. энергия).

Вовлечение в сферу эксперим. физ. исследований тепловых, световых, электрич. и магн. явлений, так или иначе связанных с механич. движением, сопровождалось введением представлений о разнообразных силах, вызывающих эти явления, и о соответствующих видах материи, служащих носителями этих сил. Так в физику вошли «весомые материи» (φλυδιαι) — тепло, электрич. и магн. жидкости и др. По мере развития физики на протяжении 18—19 вв. (волновой теории света, кинетич. теории теплоты, учения об электричестве и магнетизме) весомые материи постепенно исчезали из физ. картины мира, т. к. приписывавшиеся им явления удавалось объяснить на механич. основе. Дольше всего сохранил своё существование в физ. картине мира *эфир* как носитель эл.-магн. явлений. Для него тоже строились механич. модели, противоречившие друг другу. Термин «материя» к кон. 19 в. закрепился только за «весомой материей» — веществом.

Открытие электрона, делимости атомов вещества и их составленности из электрически заряж. частиц противуположных знаков, теоретич. и эксперим. обнаружение эл.-магн. природы массы электронов в соединении с трактовкой электричества и эфира как немате-

риальных (невещественных) субстанций, изменения состояния к-рых не всегда удавалось свести к механич. движению, породили на рубеже 19—20 вв. кризис философских оснований физики. Он выразился, в частности, в попытках мыслить движение без материи (энергетизм) и в быстрой смене механистич. картины мира электромагнитной. Вещество, рассматривавшееся в механистич. картине мира как единств. вид материи, утратило статус «первоматерии», оказавшись «состоящим из электричества». Физика вышла из кризиса путём создания новых теорий — теории относительности и квантовой теории, радикально изменивших классич. физ. представления о М. и д.

Представления о материи и движении в современной физический картине мира. Совр. физ. картину мира, в рамках к-рой осуществляется развитие физики в наши дни, можно назвать квантово-релятивистской, т. е. её основой служат осн. принципы теории относительности (специальной, или частной, и общей) и квантовой теории (нерелятивистской — квантовой механики и релятивистской — квантовой теории поля).

Спец. (частная) теория относительности (см. *Относительности теория*), установив физ. равноправие всех инерциальных систем отсчёта, показала невозможность обнаружения равномерного и прямолинейного движения относительно абсолютно покоящегося эфира и тем самым сделала его существование излишним. Благодаря этому эл.-магн. поле стало трактоваться как самостоят. вид материи, не нуждающийся в носителе. Учёт роль эл.-магн. (световых) сигналов, распространяющихся с максимально возможной в природе скоростью, в процессах измерения пространственных и временных характеристик материальных объектов, спец. теория относительности тесно связала между собой вещество и поле как виды материи с состояниями их движения.

Общая теория относительности — релятивистская теория тяготения — установила зависимость метрич. характеристик пространства-времени, отождествляемых в ней с гравитат. полем, от распределения вещества и эл.-магн. поля и установила законы движения в искривлённом пространстве-времени (см. *Тяготение*).

Квантовая механика, введя представление о мин. величине действия как характеристике взаимодействия, показала единство дискретности и непрерывности (корпускулярно-волновой дуализм) в структуре элементарных частиц вещества и эл.-магн. поля и установила безграничный характер движения микрочастиц.

Квантовая теория поля позволяла трактовать как специфич. вид движения возникновение и уничтожение элементарных частиц, объясняя их взаимодействие как обмен квантами соответствующих полей, и углубляя понимание корпускулярно-волнового дуализма, стала рассматривать вещество и поле на микроуровне как два отд. вида материи, различающиеся структурой, — соответственно дискретной (корпускулярной) и непрерывной (волновой) (что имеет место на макроуровне), а как две диалектически противоположные ипостаси единого квантового поля. В её рамках введено представление о спинофиз. форме бытия материи — *виртуальных частиц* — и физ. *скалуме* как специфич. виде материи. Эти представления придают физ. реализации философской категории возможности.

Как в нерелятивистской, так и в релятивистской квантовой теории вероятность является характеристикой способа бытия элементарных частиц вещества и поля, объективной характеристикой их движения, а не мерой нашего незнания точных особенностей движения, как это было в классич. физике.

Для теории относительности и квантовой теории характерно установление явной зависимости нек-рых характеристик физ. объектов как материальных образований (пространственных, временных, энергетических, импульсных и др.) от отношения этих объектов к эксперим. средствам познания, используемым челове-

ком как субъектом-наблюдателем для их изучения, — системе отсчёта в теории относительности и типу прибора в квантовой теории. Тем самым квантово-релятивистская картина мира отображает в себе не только характеристики природных объектов, но и объективные (материальные) характеристики познающего субъекта в процессе использования им систем отсчёта в приборах как материальных средств познания видов физ. материи и форм их движения. Объективные характеристики человека как субъекта познания применяются также для обоснования конкретных численных значений универсальных констант природы (антропологич. принципов в космологии).

Объединит. тенденции, характерные для совр. этапа развития физики, служат дальнейшей конкретизации физ. представлений о М. и д. Смысление физики элементарных частиц и космологии в модели горячей Вселенной (Большого взрыва) приводит к введению в физику идеи развития. Четыре вида взаимодействия (эл.-магнитное, гравитационное, сильное и слабое), теории к-рых раньше строились независимо друг от друга, теперь начинают рассматриваться в единстве. На основе представления о калибровочной симметрии (см. *Калибровочная инвариантность*) уже удалось построить и экспериментально подтвердить объединённую теорию эл.-магн. и слабого взаимодействий, рассматриваемых в ней как проявления единого электрослабого взаимодействия. Создание калибровочной теории сильного взаимодействия (квантовой хромодинамики) вызвало к жизни программы построения единой калибровочной теории эл.-магн., слабого и сильного взаимодействий (*великое объединение взаимодействий*) и единой теории всех четырёх видов взаимодействий (см. *Супергравитация*). Реализация этих программ приводит к значит. увеличению числа могущих существовать элементарных частиц, увеличению размерности пространства-времени, значительно усложняя и развивая физ. представления о М. и д.

На более глубоком уровне выяснилось, что элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях, состоят из более фундам. частиц — кварков. Материя представлялась в совр. физике лептонами и кварками (защитами с получленным спином) и квантами полей (фотоахн, векторными бозонами, глюонами и гипотетич. гравитонами), обладающими целым спином и осуществляющими четыре типа фундам. взаимодействий. В квантовой теории поля уже на ранних стадиях её развития выяснилась связь между свойствами частиц (значениями спинов) и квантовыми законами их движения. Построение калибровочных теорий электрослабых и сильных взаимодействий впервые в явной форме обнаружидо связи между уравнениями движения фундам. частиц и их взаимодействиями.

Висдрение физ. методов исследования и физ. представлений о М. и д. в др. естеств. науки активно содействует их внутр. единству. Так, с помощью нерелятивистской квантовой механики удалось объяснить осн. характеристики хим. формы движения материи — ат. вес, ат. номер, хим. средство и валентность хим. элементов. Физ. химия, хим. физика, квантовая химия, термодинамика необратимых процессов и процессов самоорганизации тесно смыкают физику и химию. Такие интенсивно развивающиеся науки, как биофизика, физ.-хим. биология, позволяют выявить физ., физ.-хим. и хим. составляющие биол. формы движения материи.

Вся история физики свидетельствует о непрерывном совершенствовании физ. представлений о М. и д. в прямой зависимости от уровня эксперим. техники и теоретич. разработок, демонстрируя шестеричность М. и д. как способа её существования. Развитие представлений о строении материи и ааконов её движения обнаруживает тенденцию к установлению все более полной иерархич. связи между строем материи и её движением.

Лит.: Энгельс Ф. Диалектика природы. М. 1955. К. и Энгельс Ф., Соч., 2 изд., т. 20; Денн В. И., Материализм и эмпириокритицизм, Полн. собр. соч., 5 изд., т. 18;



Дорфман Я. Г., Векторная алгебра. М.: Высшая школа, 1974; его же, Векторная алгебра. М.: Высшая школа, 1979; Марков М. А., О природе материи, М., 1976; Фундаментальная структура материи, пер. с англ., М., 1984. И. С. Алексеев.

МАТРИЦА — прямоугольная таблица

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

состоящая из  $m$  строк и  $n$  столбцов; её наз. М. размера  $m \times n$ . Элементами  $a_{ij}$  (первый индекс указывает номер строки, второй — номер столбца) М. могут быть числа, ф-ции или др. величины, над к-рыми можно производить алгебраич. операции. М. также обозначают как  $\|a_{ij}\|$ ,  $(a_{ij})$ . Наряду с конечными М. рассматривают М. с бесконечным числом строк или столбцов.

М. размера  $n \times 1$  наз. столбцом, а размера  $1 \times n$  — строкой. М., все элементы к-рой равны нулю, наз. нулевой М. и обозначается 0. М. размера  $n \times n$  наз. квадратной М. порядка  $n$ . У квадратной М. число строк равно числу столбцов. Квадратная М.  $A = \|a_{ij}\|$  наз. треугольной, если  $a_{ij} = 0$  при  $i > j$ , строго треугольной, если  $a_{ij} = 0$  при  $i \geq j$ , диагональной, если  $a_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ . Диагональная М. обычно обозначается  $\text{diag}(a_1, \dots, a_n)$ . Если все  $a_i = \alpha$ , получают скалярную М. При  $\alpha = 1$  М. наз. единичной и обозначается  $I$  или  $E$ . В квадратной М. диагональ, проведённая из верхнего левого угла в нижний правый угол, наз. гл. диагональю.

Квадратная М. наз. неособенной (невырожденной), если она имеет единств. обратную М.  $A^{-1}$ , определяемую условиями  $AA^{-1} = A^{-1}A = I$ . В противном случае  $A$  — особенная (вырожденная) М. Квадратная М. является неособенной в том и только в том случае, когда её определитель,  $\det A$ , отличен от нуля.

Понятие М. впервые появилось в сер. 19 в. в работах У. Р. Гамильтона (W. R. Hamilton) и А. Кэли (A. Cayley).

Действия над матрицами. Суммой или разностью двух  $m \times n$  М.  $A = \|a_{ij}\|$  и  $B = \|b_{ij}\|$  наз.  $m \times n$  М.  $C = \|c_{ij}\| = A \pm B$ , где  $c_{ij} = a_{ij} \pm b_{ij}$ . Произведением М.  $A = \|a_{ij}\|$  на число  $\alpha$  наз. М. с элементами  $\alpha a_{ij}$ .

Перемножать две М. можно только тогда, когда число столбцов в 1-м сомножителе равно числу строк во 2-м. Если  $A = m \times n$  М.,  $B = n \times p$  М., то  $m \times p$  М.

С с элементами  $c_{ijk} = \sum_{l=1}^n a_{il}b_{lk}$  наз. произведением М.

$A$  и  $B$  и обозначается:  $C = AB$ . Если существуют оба произведения  $AB$  и  $BA$  (это, в частности, будет всегда, если  $A$  и  $B$  — квадратные М. одного и того же порядка), то, вообще говоря,  $BA \neq AB$ . В результате перемножения двух М. можно получить нулевую М., хотя ни одна из перемножаемых М. не является нулевой. Невырожденные М. порядка  $n$  образуют группу относительно умножения, она наз. полной линейной группой  $GL(n)$ .

Определяемые выше операции обладают след. свойствами:  $A + B = B + A$ ,  $A + (B + C) = (A + B) + C$ ,  $(AB)C = A(BC)$ ,  $A(B + C) = AB + AC$ ,  $A + 0 = A$ ,  $0B = C0 = 0$ ,  $IA = AI = A$ .

Транспонированием М.  $A = \|a_{ij}\|$  размера  $n \times m$  наз. замена её строк столбцами (1-я строка заменяется на 1-й столбец, 2-я строка на 2-й столбец и т. д.), т. е. это переход к М.  $A' = \|a'_{ij}\|$  размера  $m \times n$  такой, что  $a'_{ij} = a_{ji}$ . Комплексным сопряжением М.  $A = \|a_{ij}\|$  наз. переход к М.

$A^* = \|a^*_{ij}\|$ , где  $*$  означает комплексное сопряжение.

Эрмитовым сопряжением М.  $A = \|a_{ij}\|$  размера  $n \times m$  наз. переход к М.  $A^+ = (A')^* = (A')^*$  размера  $m \times n$ . М.  $A^+$  наз. эрмитово сопряжённой с М.  $A$ . Имеют место след. соотношения:  $(A + B)^+ = A^+ + B^+$ ,  $(\alpha A)^+ = \alpha^* A^+$ ,  $(AB)^+ = B^+ A^+$ ,  $(A^+)^+ = (A^+)^+$ ,  $(A^+)^+ = A$ ,  $0^+ = 0$ ,  $I^+ = I$ .

Квадратные матрицы. Квадратная М.  $A$  наз. симметричной, если  $A' = A$ ; антисимметричной, если  $A' = -A$ ; Эрмитовой (самосопряжённой), если  $A' = A^+$ ; антиэрмитовой, если  $A' = -A^+$ ; ортогональной, если  $A'A = A^+A = I$ ; унитарной, если  $A'A^+ = AA^+ = I$ ; унимодулярной, если  $\det A = 1$ . Для каждой М.  $A$  с комплексными элементами  $S_1 = (A + A^+)^2/2$  есть симметричная,  $S_2 = (A - A^+)^2/2$  — антисимметричная,  $H_1 = (A + A^+)^2/2$  — эрмитова и  $H_2 = (A - A^+)^2/2$  — антиэрмитова М.  $A = S_1 + S_2$  — разложение (единств.) данной М. в сумму симметричной и антисимметричной М.  $A = H_1 + H_2$  — разложение (единств.) данной М. в сумму эрмитовой и антиэрмитовой М.

Существует т. н. полярное разложение  $A = QU$  М.  $A$  в произведение эрмитовой М.  $Q$  и унитарной М.  $U$ . М.  $Q$  однозначно определяется условием  $Q^2 = A^+A$ , а М.  $U$  однозначно определяется в том и только в том случае, если  $A$  — невырожденная М. (это разложение аналогично представлению комплексного числа в виде  $z = re^{i\varphi}$ ).

М.  $A$ , для к-рой выполняется условие  $A^+A = AA^+$ , наз. нормальной М. М.  $A$  нормальна тогда и только тогда, когда её можно преобразовать в диагональную М.  $D$  унитарным преобразованием, т. е.  $U^{-1}AU = D$ .

М.  $A$  наз. подобной М.  $A$ , если существует такая неособенная М.  $T$  (преобразующая М.), что  $A = T^{-1}AT$ ;  $A$ ,  $A'$  и  $T$  должны быть М. одного и того же порядка. Переход от М.  $A$  к М.  $A'$  наз. преобразованием подобия. При каждом преобразовании подобия сохраняются инварианты матрицы. Две подобные М. имеют один и тот же ранг, один и тот же след, один и тот же определитель. Все подобные М. образуют класс подобных матриц, и важной задачей теории М. является выбор М. простейшего вида в этом классе — приведение М. к канонич. форме. Решение этой задачи тесно связано с нахождением собств. значений М. (см. ниже).

Любая М. подобна треугольной М., диагональные элементы к-рой — собств. значения М. Матрицу  $A$  можно преобразованием подобия с унитарной преобразующей матрицей  $T$  привести к диагональному виду в том и только в том случае, если  $A$  подобна нек-рой нормальной М. В этом случае диагональные элементы М.  $A = T^{-1}AT$  являются собств. значениями М. Эрмитовы и унитарные М. (а потому действительные и симметричные или ортогональные М.) представляют собой частные случаи нормальных М., поэтому все они приводятся к диагональному виду.

Теория М. тесно связана с теорией линейных преобразований векторных пространств (см. Линейный оператор).

Собственными значениями (собств. числами, характеристич. числами) М.  $A = \|a_{ij}\|$  наз. корни характеристического уравнения матрицы  $\det(A - \lambda I) = 0$ . М. удовлетворяет своему характеристич. ур-нию. Если  $\lambda$  — собств. значение М.  $A$  порядка  $n$ , то существует ненулевой столбец (вектор-столбец)  $k$  такой, что  $Ak = \lambda k$ . Этот вектор-столбец наз. собственным (характеристическим) вектором М.  $A$ , соответствующим собств. значению  $\lambda$ . Спектром (собств. значений) М.  $A$  наз. множество всех её собств. значений. Собств. значения М.  $A$  обладают след. свойствами:

$$\text{Tr}A = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n, \det A = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n,$$

где  $\text{Tr}A$  = след М.  $A$ . Следовательно, если хотя бы одно собств. значение равно нулю, то М. является особенной (вырожденной).

Если  $M$  —  $A$  порядка  $n$  и имеет  $l$  разл. собств. значений  $\lambda_1, \dots, \lambda_l$ , то существует  $l$  независимых собств. векторов  $k_1, \dots, k_l$ , соответствующих этим собств. значениям. Если  $A$  — действительная и симметричная  $M$ , и если  $\lambda_i \neq \lambda_j$ , то  $(k_i, k_j) = 0$  ( $k_i$  — вектор-строка, получающаяся транспонированием вектора-столбца  $k_j$ ). Если  $M$  — невырожденная, то собств. значениями  $M^{-1}$  являются  $\lambda_1^{-1}, \dots, \lambda_l^{-1}$ , а собств. векторами по-прежнему

векторы  $k_1, \dots, k_l$ . Если  $|\lambda_1|$  — наиб. модуль  $l$  собств. значений  $M$   $A$  порядка  $n$ , то при  $p \rightarrow \infty$ ,  $A^p x \rightarrow k_1$ , где  $x$  — произвольный вектор-столбец. Для действительной ортогональной  $M$ ,  $A$   $|A| = 1$  для всех  $i$ . Если  $A$  — симметричная  $M$ , и не все собств. значения различны, всё равно можно найти  $l$  взаимно ортогональных собств. векторов. Если каждый такой вектор  $k_i$  нормирован, т. е. умножен на  $(k_i k_i)^{-1/2}$ , то  $M \cdot K = K_1, \dots, K_n$  ортогональна в  $K^* A K = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ . Вообще, если  $M$  —  $A$  порядка  $n$  и имеет  $l$  разл. собств. значений  $\lambda_1, \dots, \lambda_l$ ,  $l$ -к-рым соответствуют независимые собств. векторы  $k_1, \dots, k_l$ , то  $M \cdot T = (k_1, k_2, \dots, k_n)$  преобразует  $A$  в диагональную  $M \cdot T^{-1} A T = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ . Если не все  $l$  собств. значений различны, то такое преобразование может оказаться невозможным.

Если  $H$  — эрмитова  $M$  порядка  $n$ , то её собств. значения всегда действительны и всегда можно найти  $l$  собств. векторов  $k_1, \dots, k_n$  таких, что  $(k_i, k_j) = \delta_{ij}$ . Унитарная  $M$ ,  $U = (k_1, \dots, k_n)$  преобразует  $H$  к диагональному виду.

С каждой  $M$  —  $A$  порядка  $n$  связана квадратичная форма от  $n$  комплексных переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , образующих столбец  $x$ :

$$x^* A x = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i^* x_j.$$

Эрмитова форма  $x^* H x$ , где  $H$  — эрмитова  $M$ , принимает только действит. значения; она наз. положительно определенной или отрицательной, если  $x^* H x > 0$  или  $x^* H x \leq 0$  для каждого набора  $x \neq 0$ .

Аналитич. функцию матрицы  $A$  порядка  $n$  определяют при помощи ряда  $\sum_{k=0}^{\infty} a_k A^k$  по степеням  $A$ .

Каждый такой ряд можно свести к многочлену  $n$ -й степени от  $A$ , т. к.  $M$  —  $A$  удовлетворяет своему характеристич. уравн.  $M$  —  $A$  наз. нильпотентной, если  $A^k = 0$  при нек-ром целом положительном  $k$ .  $M$  —  $A$  тогда и только тогда nilpotentna, когда все её собств. значения равны нулю.

$M$ , имеющую более чем одну строку и столбец, можно разбить на меньшие прямоугольные подматрицы (блоки), проводя между столбцами и (или) строками прямые линии. Две соответствующим образом разбитые  $M$  —  $A$  и  $B$  размера  $n \times n$  можно перемножить, пользуясь входящими в них подматрицами как элементами в обычной ф-ле произведения  $M$ ; получающиеся таким путем элементы произведения являются подматрицами  $M \cdot B$  размера  $n \times n$ .  $M$ , разбитую на блоки, наз. клеточной (блочной)  $M$ . Прямым (внешним, кронекевским) произведением  $M$  —  $A$  и  $B$  наз. блочная  $M \cdot C = A \times B$ , блоки  $k$ -рой имеют вид  $a_{ij} B$ . Если для  $M$  —  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  существуют произведения  $AC$  и  $BD$ , то  $(A \times B)(C \times D) = AC \times BD$ . Если  $M$  —  $A$  имеет вид

$$A = \begin{vmatrix} A_1 & 0 & \dots \\ 0 & A_2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{vmatrix},$$

т. е. является диагональной  $M$  с диагональными элементами в виде квадратных подматриц  $A_1, A_2, \dots$ , то такая

$M$  наз. клеточно-диагональной. В этом случае  $\text{Tr} A = \text{Tr} A_1 + \text{Tr} A_2 + \dots$ ,  $\det A = \det A_1 \det A_2 \dots$ . Клеточно-диагональной  $M$  является норма  $l$  в  $l$ -я (корданова) форма, к  $k$ -рой можно привести образование подобия привести любую  $M$ . При этом в каждой диагональной клетке вдоль гл. диагонали повторяется одно и то же число, а параллельный ряд над гл. диагональю состоит из 1. Все остальные элементы в диагональных клетках равны нулю:

$$A_i = \begin{vmatrix} \lambda_i & 1 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_i & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_i \end{vmatrix}.$$

Важную роль играют  $M$  в квантовой механике, где динамик. наблюдаемым величинам сопоставляют эрмитовы  $M$ , собств. значения  $k$ -рых соответствуют экспериментально наблюдаемым значениям этих физ. величин. При описании квантовомеханич. явлений, в  $k$ -рых участвуют частицы, обладающие спином, используют Паули матрицы и Дирака матрицы. В квантовой теории поля, где существуют разл. группы симметрии, рассматривают матричные представления групп.

Мн. задачи по обращению  $M$ , находящему их собств. значений и т. д., возникающие в физ. исследованиях, решают с помощью ЭВМ.

Лит.: М а л ы в е в А. И., Основы линейной алгебры, 4 изд., М., 1975; Г а н т м а х е р Ф. Р., Теория матриц, 4 изд., М., 1988; М и ш и н А. П., П р о с т р а н с т в о в а я В ы с ш а я алгебра, 2 изд., М., 1965; Б о р е в и ч З. И., Определители и матрицы, 3 изд., М., 1988; В е л д ж а н Р., Введение в теорию матриц, пер. с англ., 2 изд., М., 1976; М а р к у с М. М. и Я н г Л., Обзор по теории матриц и матричных неравенств, пер. с англ., М., 1972. С. И. Азаров.

**МАТРИЦА КОГЕРЕНТНОСТИ** —  $(2 \times 2)$ -матрица, характеризующая поляризац. структуру  $\chi$ -магн. поля, элементами  $k$ -рой являются корреляц. ф-ции

$G_{ij}(\tau) = \langle V_i(t) V_j^*(t + \tau) \rangle$  (см. *Когерентность света*).

Здесь  $V_i(t)$  — компонента стационарного лучевого поля в плоскости, перпендикулярной волновому вектору. (Если волновой вектор направлен, напр., вдоль оси  $z$ , то  $i, j = x, y$ .) При  $\tau = 0$  диагональными элементами  $M$  к. являются ср. интенсивности ортогональных компонент  $G_{xx}(0) = I_x$ ,  $G_{yy}(0) = I_y$ ; внедиагональные элементы  $G_{xy}(0)$ ,  $G_{yx}(0)$  характеризуют взаимную корреляц. компонент.

Элементы  $M$  к. определяют контраст интерференционной картины. Поле излучения и ср. интенсивности на выходе поляризатора, ориентированного под углом  $\theta$  к оси  $x$ , даются соответственно выражениями

$$V(t) = V_x(t) \cos \theta + V_y(t) e^{i\varphi} \sin \theta. \quad (1)$$

( $\varphi$  — фазовый сдвиг между компонентами),

$$I = I_x \cos^2 \theta + I_y \sin^2 \theta + \text{Re} \{ G_{xy}(0) e^{i\varphi} \} \sin 2\theta. \quad (2)$$

Контраст (видность) интерференц. картины (2)

$$w = \frac{I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}}{I_{\text{макс}} + I_{\text{мин}}} = \frac{|G_{xy}(0)| \sin 2\theta}{I_x \cos^2 \theta + I_y \sin^2 \theta}. \quad (3)$$

В случае  $I_x = I_y$  и  $\theta = \pi/4$   $w = |G_{xy}(0)|/I_x = |Y_{xy}|$  ( $Y_{xy}$  — степень взаимной когерентности ортогональных компонент). Для неполяризов. излучения  $Y_{xy} = 0$ , т. е.  $G_{xy}(0) = G_{yx}^*(0)$ . Для полностью поляризов. излучения  $|Y_{xy}| = 1$ . Любую  $M$  к. можно представить в виде суммы матриц для полностью поляризованного и неполяризованного излучений. Степень поляризации, определяемая как отношение интенсивности полностью поляризов. излучения к полной интенсивности, связана с контрастом (3) и дается выражением

$$P = \left\{ 1 - 4 \frac{\text{det} \| G_{ij} \|}{(\text{Sp} \| G_{ij} \|^2)} \right\}^{1/2},$$

где det — определитель М. к. Sp — её шпур. Векториана  $P$  является, т. о., инвариантом. Для полностью поляризованного и неполяризованного поля  $P = 1$  и  $P = 0$  соответственно. В случае  $0 < P < 1$  поле частично поляризовано.

Лит.: Шерк и Ф. У., Поляризованный свет. Получение и использование, пер. с англ., М., 1965; Берн М., Вольф Ф., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973; Песриана И., Когерентность света, пер. с англ., М., 1974; Пондрик С. И., Мелицкий В. А., Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн, М., 1974; Потелли В. А., Татаринов В. Н., Теория когерентности электромагнитного поля, М., 1978. А. С. Чиркин.

**МАТРИЦА ПЛОТНОСТИ** (статистический оператор) — оператор, при помощи которого можно вычислить ср. значение любой физ. величины в квантовой статистич. механике и, в частности, в квантовой механике. Термин «М. п.» связан с тем, что статистич. оператор обычно задается в матричной форме и определяет плотность вероятности. М. п. введена Дж. фон Нейманом (J. von Neumann) и Л. Д. Ландау в 1927.

В квантовой механике ср. значение физ. величины, представляемой оператором  $\hat{A}$ , в квантовом состоянии,  $k$ -рое описывается волновой ф-цией  $\psi(x)$ , равно

$$\bar{A} = \langle \psi, \hat{A} \psi \rangle = \int \psi^*(x) \hat{A} \psi(x) dx,$$

\* означает комплексное сопряжение (для частиц со спином нужно учесть зависимость волновой ф-ции от спиновых переменных и, кроме интегрирования, выполнить суммирование по возможным значениям спина). Соответствующий статистич. ансамбль наз. *ч. с. т. м. в к. с. м. б. л. е. м.* а состояние,  $k$ -рое можно описать волновой ф-цией, — *ч. т. м. в к. с. м. б. л. е. м.* Вся квантовая механика, за исключением нек-рых вопросов теории измерений, основана на применении чистых ансамблей.

Квантовая статистич. механика основана на использовании статистич. ансамбля более общего типа, а именно смеси ансамбля (или смеси состояний),  $k$ -рый характеризуется заданием лишь вероятностей  $w_k$ , ... вероятности системы в разл. квантовых состояниях, описываемых волновыми ф-циями  $\psi_1, \psi_2, \dots$ . Для такого ансамбля ср. значение величины  $\hat{A}$  определяется ф-лой

$$\bar{A} = \sum_k w_k \langle \psi_k, \hat{A} \psi_k \rangle, \quad \sum_k w_k = 1, \quad w_k > 0,$$

$k$ -рую можно записать в виде

$$\bar{A} = \text{Sp}(\hat{\rho}) = \iint A(x, x') \rho(x', x) dx dx',$$

$$\rho(x, x') = \sum_k w_k \psi_k(x) \psi_k^*(x'),$$

где Sp — след оператора, а  $\rho(x, x')$  — М. п. в  $x$ -представлении,  $x$  — совокупность одночастичных координат  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , для частиц со спином  $\sigma_i$  включает спин  $\sigma_i$ . Матричный элемент оператора  $\hat{A}$  в  $x$ -представлении определяется соотношением

$$A(x, x') = \sum_{h, h'} \psi_h(x) \langle \hat{A} \rangle_{hh'} \psi_{h'}^*(x').$$

Чистое состояние есть частный случай смешанного, когда вероятность состояния  $k$  равна 1, а вероятности остальных — нулю. В этом случае М. п. равна произведению волновых ф-ций

$$\rho(x, x') = \psi_k(x) \psi_k^*(x').$$

В общем случае М. п. нельзя представить в такой форме, преобразуя волновые ф-ции. Описание системы с помощью М. п. является неполным с точки зрения квантовой механики, т. к. оно не основано на максимально полном наборе данных, как при описании с помощью волновой ф-ции, но в статистич. механике эта

«неполнота», как правило, не является недостатком. Полное описание системы очень большого числа частиц не только чрезвычайно сложно, но и излишне, поскольку для таких систем проявляются статистич. закономерности. Однако для осн. состояния квантовой механики систем с большим числом частиц иногда удается в нек-ром приближении теоретически рассчитать волновые ф-ции и пользоваться чистым ансамблем.

Физ. смысл М. п. можно пояснить, рассматривая подсистему с координатами  $x$  квантовомеханич. изолир. системы с координатами  $q, x$ ,  $k$ -рая описывается волновой ф-цией  $\psi(q, x)$ . Ср. значение величины  $\hat{A}$ , относящейся к подсистеме и зависящей лишь от  $x$ , равно

$$\bar{A} = \iint \psi^*(q, x) \hat{A} \psi(q, x) dq dx.$$

Определяя линейный оператор  $\hat{A}$  в матричном координатном представлении с помощью соотношения

$$\hat{A} \psi(q, x) = \int A(x, x') \psi(q, x') dx',$$

получаем для ср. значения оператора выражение

$$\bar{A} = \iiint \psi^*(q, x') \psi(q, x) A(x, x') dx dx' dq = \iint \rho(x', x) A(x, x') dx dx' = \text{Sp}(\rho \hat{A}),$$

где

$$\rho(x, x') = \int \psi(q, x) \psi^*(q, x') dq$$

М. п. подсистемы  $x$ . Диагональные элементы М. п.  $\rho(x, x')$  определяют вероятности координат подсистемы. Т. о., состояние подсистемы описывается не волновой ф-цией, а М. п.

М. п. обладает след. свойствами: из нормировки вероятности вытекает, что  $\text{Sp} \rho = \sum_k w_k = 1$ , М. п. — эрмитова, т. е.  $\rho(x, x') = \rho^*(x', x)$ , и, кроме того, симметрична относительно перемешанных  $x_1, \dots, x_n$  (или  $x'_1, \dots, x'_n$ ), включая спиновые переменные, для *Бозе — Эйнштейна статистики* и антисимметрична для *Ферми — Дирака статистики*.

Если М. п. удовлетворяет условию  $\rho^2 = \rho$ , то рассматриваемая система находится в чистом состоянии и обладает определ. волновой ф-цией. Действительно, когда  $\rho$  приведено к диагональной форме, это означает, что  $k$ -л. один из матричных элементов  $\rho_{kk}$  равен 1, а остальные элементы равны нулю. Для любой физ. величины  $\hat{A}$  тогда имеем  $\bar{A} = A_{kk}$ , что соответствует наличию определ. волновой ф-ции  $\psi_k$ . В этом случае нет необходимости вводить М. п.

М. п. удовлетворяет квантовому ур-нию Лиувилля

$$i\hbar \partial \rho / \partial t = [H, \rho] = H\rho - \rho H,$$

аналогичному ур-нию Лиувилля в классич. статистич. механике. Это ур-ние получается из того факта, что  $\psi_k(x)$  удовлетворяет ур-нию Шредингера. В стационарном состоянии  $\partial \rho / \partial t = 0$  и  $[H, \rho] = 0$ , т. е. М. п. — интеграл движения. Это свойство является исходным при построении равновесных статистич. ансамблей и перенесения идей Гиббса в квантовую статистику. Напр., для микроканонич. ансамбля  $w(\mathcal{E}_k) = \text{const}$  при  $\mathcal{E}_k \leq \mathcal{E}_k + \Delta \mathcal{E}$ ,  $\Delta \mathcal{E} \ll \mathcal{E}_k$  и  $w = 0$  вне этого интервала, где  $\mathcal{E}_k$  — собств. значение гамильтониана  $H$ . Для канонич. ансамбля

$$w(\mathcal{E}_k) = \exp \{-(F - \mathcal{E}_k) / \theta\}$$

( $F$  — свободная энергия, или энергия Гельмгольца;  $\theta = kT$ ;  $T$  — абс. темп-ра). В этом случае  $\rho = \exp \{(F - H) / \theta\}$  или, в матричной форме,

$$\rho(x, x') = \sum_k \psi_k^*(x') \exp \{(F - H) / \theta\} \psi_k(x).$$

М. п. применяют в теории необратимых процессов. Если при  $t \rightarrow \infty$  система с гамильтонианом  $H$  нахо-

дился в состоянии статистич. равновесия, а затем аддитивно было включено внеш. возмущение  $H_1$  (напр., вызванное электрич. или магн. полем), зависящее от времени, то с помощью  $\rho(t)$  можно найти реакцию системы на внеш. возмущение. В линейном приближении по внеш. возмущению

$$\rho(t) = \rho_0 + (i\hbar)^{-1} \int_{-\infty}^t \exp\{iH(\tau-t)/\hbar\} [H'_1, \rho_0] \times \\ \times \exp\{-iH(\tau-t)/\hbar\} d\tau,$$

$\rho_0$  — статистич. оператор в состоянии равновесия. Отсюда для ср. значения оператора получим

$$\bar{A} = \langle \hat{A} \rangle + (i\hbar)^{-1} \int_{-\infty}^t \langle [\hat{A}(t), H'_1(\tau)] \rangle d\tau,$$

(...) =  $\text{Sp}(\rho_0 \dots)$  и операторы взяты в гейзенберговском представлении:

$$\hat{A}(t) = e^{iHt/\hbar} \hat{A} e^{-iHt/\hbar}, H'_1(\tau) = e^{iH\tau/\hbar} H'_1 e^{-iH\tau/\hbar}.$$

Эти ф-лы можно представить через двухвременные за-называемые Грина функции, что используют в теории электропроводности и магн. резонанса.

М. п. применяют для построения операторов плотности комплексов молекул, удовлетворяющих цепочке Боголюбова уравнений, с помощью к-рой можно обосновать кинетику, ур-ние квантового газа.

М. п. используют в теории поляризов. пучков частиц со спином (магн. моментом) или фотонов. Напр., М. п. пучка частиц со спином  $\pm 1/2$  в смешанном состоянии имеет вид

$$\rho = w_a |X_a\rangle \langle X_a| + w_b |X_b\rangle \langle X_b|, \quad w_a + w_b = 1,$$

$|X_a\rangle, |X_b\rangle$  — спиновые ф-ции двух разл. суперпозиций состояний  $|\pm 1/2\rangle, |-\pm 1/2\rangle$ . М. п. в представлении спиновых ф-ций  $|\pm 1/2\rangle$  дается выражением

$$\rho = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + P_z & P_x - iP_y \\ P_x + iP_y & 1 - P_z \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (e + \sum_i P_i \sigma_i),$$

где  $P_i = \text{Sp}(\rho \sigma_i)$  —  $i$ -я компонента поляризации,  $\sigma_i$  — матрицы Паули,  $e$  — единичная матрица. М. п. пучка фотонов с разл. поляризацей имеет аналогичный вид и зависит от трёх Стокса параметров, описывающих степень линейной и круговой полполяризации относительно разл. осей.

Смешанный ансамбль частиц в разл. состояниях угл. момента  $|JM\rangle$  описывается М. п. с элементами  $\langle JM|\rho|J'M'\rangle$ :

$$\rho = \sum_{J'J''M'M'} \langle J'M'|\rho|JM\rangle |J'M'\rangle \langle JM|.$$

Для того чтобы учесть симметрию, связанную с угл. моментом частиц ансамбля, удобно разложить  $\rho$  по неприводимым тензорным операторам угл. моментов  $T(J'J)_{KQ}$ :

$$\rho = \sum_{J'J''KQ} \langle T(J'J)_{KQ}^+ \rangle T(J'J)_{KQ}$$

где

$$|J' - J| \leq K \leq J' + J, \quad -K \leq Q \leq K,$$

$$T(J'J)_{KQ} = \sum_{M'M'} (-1)^{J-M} \langle J'M', J-M | KQ \rangle |J'M'\rangle \langle JM|,$$

$\langle J'M', J-M | KQ \rangle$  — Клебша — Гордана коэффициенты,  $K, Q$  — полный момент и его  $z$ -компонента,  $T(J'J)_{KQ}$  — матрица, имеющая  $2J' + 1$  строк и  $2J + 1$  столбцов.

Величины

$$\langle T(J'J)_{KQ}^+ \rangle = \text{Sp}(\rho T(J'J)_{KQ}^+)$$

наз. мультиполями состояния и характеризуют свойства поляризации и когерентности пучков. Три параметра (при  $J' = J$ )  $\langle T(J'J)_{KQ}^+ \rangle$  с  $Q = \pm 1, 0$  наз. вектором ориентации и характеризуют средний по ансамблю угл. момент. Тензор 2-го ранга  $\langle T(J'J)_{KQ}^+ \rangle$  наз. тензором выстроенности, он пропорционален ср. сферич. компонентам тензора эллектрич. квадрупольного момента.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Квантовая механика, 4 изд., М., 1989, §4; и т. же, Статистическая физика, ч. 1, 3 изд., М., 1978, § 5; Мандельштам Л. И., Полн. собр. трудов, т. 5, М., 1950; Фон Нейман И., Математические основы квантовой механики, пер. с нем., М., 1964, гл. 5; Боголюбов Н. Н., Избр. труды, т. 2, К., 1970, с. 288; Зубарев Д. Н., Нерезонансная статистическая термодинамика, М., 1971, гл. 2—3; Александров И. В., Теория магнитной релаксации, М., 1975; Блум К., Теория матрицы плотности и ее приложения, пер. с англ., М., 1983.

**МАТРИЦА РАССЕЯНИЯ** ( $S$ -матрица) в квантовой теории — оператор, переводящий состояние системы (точнее, вектор состояния)  $\Phi_{-\infty}$  до рассеяния (или реакции) в состояние  $\Phi_{+\infty}$  после рассеяния:

$$\Phi_{+\infty} = S\Phi_{-\infty}. \quad (1)$$

В конкретном представлении (см. Представлений теория) таким оператором является матрица, строки и столбцы к-рой удобно нумеровать значениями полного набора физ. величин, сохраняющихся при свободном движении частиц. М. р. имеет важное значение в квантовой механике и является одним из осн. объектов в квантовой теории поля.

Понятие М. р. возникает в квантовохимич. задаче о рассеянии на потенциальном центре (см. Рассеяние микрочастиц). Физ. картина рассеяния бесспиновой частицы на финитном потенциале  $V(r)$  подсказывает, что в асимптотике (при  $r = |r| \rightarrow \infty$ ) решение стационарного Шредингера уравнения

$$-\Delta\psi(r) + V(r)\psi(r) = k^2\psi(r)$$

( $\Delta$  — Лапласа оператор,  $k$  — импульс частицы; принята система единиц, в к-рой  $\hbar = c = 1$ ) должно иметь слагаемое, отвечающее частице,летающей на рассеивающий центр по направлению  $\mathbf{n} = \mathbf{k}/k$ ,  $k = |\mathbf{k}|$ ,

$$\psi \sim \frac{e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}}}{r} \delta(\mathbf{n} + \mathbf{n}), \quad (2)$$

и слагаемое, описывающее удаляющуюся по всем возможным направлениям  $\mathbf{n} = \mathbf{r}/r$  частицу,

$$\psi \sim \frac{-e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}}}{r} S(k; \mathbf{n}, \mathbf{n}). \quad (3)$$

Здесь  $\delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0)$  —  $\delta$ -функция на единичной сфере, определяемая соотношением

$$\int f(\mathbf{n}) \delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0) d\mathbf{n} = f(\mathbf{n}_0), \quad d\mathbf{n} = \sin \theta d\theta d\varphi$$

в сферич. системе координат.

Для свободной частицы  $[V(r) = 0]$  при  $r \rightarrow \infty$  имеем

$$\psi_{\mathbf{k}}^0(r) = \frac{k}{2\pi i} e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} = \\ = \frac{e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}}}{r} \delta(\mathbf{n} + \mathbf{n}) - \frac{e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}}}{r} \delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}) + O(r^{-2}), \quad (4)$$

так что в отсутствие взаимодействия М. р. тривиальна:

$$S^0(k; \mathbf{n}, \mathbf{n}) = \delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}). \quad (5)$$

Для нетривиального рассеяния М. р. определяется как интегральный оператор  $S$  с ядром

$$S(k; \mathbf{n}, \mathbf{n}) = \delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}) + \frac{ik}{2\pi} f(k; \mathbf{n}, \mathbf{n}); \quad (6)$$

ф-ция  $f$  наз. *амплитудой рассеяния*.  $S$  действует в пространстве квадратично суммируемых на сфере ф-ций (*волновых пакетов*). Благодаря описанному выше асимптотич. поведению этот оператор унитарен. Существование решений  $S$  с нужным асимптотич. поведением следует из нестационарной теории рассеяния.

Для физ. приложений удобен др. базис в пространстве состояний — состояния  $s$  с опред. энергией и угл. моментом,  $|k, l\rangle$  (где  $l$  — орбитальное квантовое число). Тогда  $S$  представляется для бесспиновых частиц диагональной матрицей

$$\langle l', k' | S | k, l \rangle = \delta(k - k') \delta_{ll'} e^{2i\delta_l}, \quad (7)$$

где  $\delta_l(k)$  — фаза рассеяния ( $\delta_{ll'}$  — символ Кронекера).

В более сложных случаях (частицы со спином, неупругое рассеяние, процессы рассеяния и поглощения частиц в релятивистской теории) элементы  $S$ -матрицы подучают новые квантовые числа, и она перестаёт быть диагональной. Однако во всех случаях эфф. сечения непосредственно выражаются через квадраты модулей её элементов.

Т. о., для решения задачи рассеяния достаточно знать только асимптотику волновой ф-ции (или  $S$ -матрицу), а не её поведение при всех конечных  $r$ . Это побудило В. Гейзенберга (W. Heisenberg), исходящего из общ. идеологии во исключении непопадаемых величин, выдвинуть в 1943  $S$ -матрицу как осн. объект теории, позволяющую характеризующий взаимодействие частиц, к-рый должен строиться непосредственно, без обращения к *дактилатанчану* и связанному с детальным пространственно-временным описанием ур-нию Шрёдингера.

В *Фока представлении*  $S$ -матрица, как и любой др. оператор, может быть записана в виде формально-го ряда по операторам рождения и уничтожения, коэффициенты ф-ции  $k$ -рого непосредственно связаны с амплитудами перехода между любыми состояниями независимых частиц. Эти коэффициенты ф-ции не могут быть совершенно произвольными. Определ. фундам. физ. требования, к-рым обязательно должна удовлетворять  $S$ -матрица, налагают на них ряд ограничений и взаимных связей. Из этих требований Гейзенбергом были явно сформулированы: 1) релятивистская ковариантность, т. е. вытекающее из *относительности теории* требование независимости теоретич. предсказаний от выбранной системы координат ( $S$  должна быть инвариантом); 2) унитарность:

$$SS^+ = S^+S = 1 \quad (8)$$

( $+$  означает эрмитово сопряжение), необходимая, чтобы сохранялась норма вектора состояния (вероятность найти систему после рассеяния в к.-л. состоянии должна равняться единице). В условии унитарности включают и требование существования полной системы состояний. Однако Гейзенберг не рассматривает требования причинности, к-рому, хотя бы в виде условия макропричинности, теория обязательно должна удовлетворять. Поэтому такая постановка задачи оказалась слишком общей и не принесла сразу конечных результатов.

В дальнейшем в работах Э. Штюкельберга (E. C. G. Stueckelberg) и Н. Н. Боголюбова требование причинности было учтено. Чтобы его сформулировать, необходимы к.-л. локальные операторы. Н. Н. Боголюбов ввёл для этой цели вариационные производные  $S$ -матрицы по локальным (зависим от точки  $x$  пространственно-временн.) объектам (полям). В фокковском представлении  $S$ -матрицу можно представить в виде разложения по *нормальным произведениям* локальных квантовых полей  $\phi(x)$  (см. *Квантовая теория поля*):

$$S = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-i)^n}{n!} \int dx_1 \dots dx_n \Phi^n(x_1, \dots, x_n) : \phi(x_1) \dots \phi(x_n) : \quad (9)$$

Под знаком нормального произведения : ... : поля  $\phi(x)$  удовлетворяют *Кейна — Гордона уравнению* или, как говорят, находятся на поверхности энергии. Чтобы воспользоваться обычным определением вариационной производной *функционала*, следует рассматривать это разложение при любых  $\phi(x)$ , т. е. расширив за поверхность энергии.

Т. о., чтобы наложить условие причинности и извлечь заложённую в нём физ. информацию, приходится сначала расширить введённое Гейзенбергом понятие М. р. до более широкого объекта —  $S$ -матрицы вне поверхности энергии, сформулировать для него условие микропричинности и после этого использовать связь между матричными элементами, к-рые из него следуют. Подчёркнём, что в конце концов с наблюдаемыми величинами опять связывается только ограниченное М. р. на энергетическую поверхность.

Довести этот путь прямого построения М. р. до конечных ф-л, дающих полное описание рассеяния, удастся только, если прибегнуть к разложению в ряды теории возмущений. При этом оказывается, что требования релятивистской инвариантности, унитарности и причинности ограничивают теорию столь же сильно, как и принятие гамилтониана метода, и приводит по существу к тем же результатам, как и развитый С. Томонагой (S. Tomonaga) и Ю. Швингером (J. Schwinger) способ, обобщающий на релятивистских случаях упомянутый выше метод получения М. р. через асимптотику решений ур-ний Шрёдингера. На обоих путях для М. р. получается компактная символич. запись в виде т. н. хронологич. экспоненты (см. *Хронологическое произведение*):

$$S = T \left\{ \exp \left[ i \int L_{\text{int}}(x) dx \right] \right\}, \quad (10)$$

где  $L_{\text{int}}(x)$  — *лагранжиан взаимодействия* во *взаимодействии представления*. Фактически ата ф-ла — краткая запись ряда теории возмущений, последоват. члены к-рого изображаются *Фейнмана диаграммами*, вычисляемыми с помощью правил Фейнмана, с применением процедуры *перенормировок*.

Однако теории возмущений не всегда применимы. В таких случаях пользуются др. методами, в к-рых центр. роль играют рассмотрение М. р. в целом и изучение общих свойств её матричных элементов, прямо описывающих амплитуды процессов рассеяния и рождения. Гейзенберговские локальные операторы могут быть тогда выражены через расширенную на поверхность энергии М. р. и играют важную роль, поскольку через них вкладывается центральное в  $S$ -матричном подходе условие причинности Боголюбова. Это условие приводит к обращению в нуль матричных элементов М. р. в определ. пространственно-временных областях. С др. стороны, условие унитарности в комбинации с положительностью масс всех состояний полной системы (условием спектральности) приводит к обращению в нуль фурье-образов тех же матричных элементов в определ. импульсных областях. Из этих двух свойств можно вывести, что для каждого заданного числа и сорта частиц амплитуды всех возможных реакций суть граничные значения одной *аналитической функции* многих комплексных переменных, фактически зависящей лишь от их лоренц-инвариантных комбинаций. Из этих свойств голоморфности можно вывести ряд непосредственно связывающих опытные факты физ. следствий. Так, в простых случаях двухчастичного рассеяния, напр. для рассеяния пионов на нуклонах, выписываются дисперсионные соотношения, выражающие вещественную часть амплитуды рассеяния через интеграл от её мнимой части (см. *Дисперсионный соотношений метод*). На этом пути приходят и к др. важным модельно независимым результатам, не опирающимся на конкретную форму взаимодействия, таким, как *перекрёстная симметрия, правила сумм, асимптотические теоремы*, результаты относительно асимптотич. автомодельно-

сти формфакторов. В то же время этот путь позволяет исследовать многие сложные явления типа *глубоко неупругих процессов* и даёт благодаря условиям унитарности и перекрёстной симметрии способы исследования связей между амплитудами и сечениями отд. процессов.

Т. о., исследование аналитич. свойств амплитуд, основанное на аксиоматическом  $S$ -матричном подходе с условиями причинности и предположениями о спектре масс (см. *Аксиоматическая квантовая теория поля*), позволяет получать, хотя и ограниченные, но важные точные результаты.

Лит. H. E. N. J. B. G. W., *Verobacht. Grössen in der Theorie der Elementarteilchen*, «Z. Phys.», 1943, Bd 120, S. 513, 473; Нейстедер Развитие квантовой электродинамики, сб. ст., под ред. Д. Л. Иваненко, М., 1954; Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Введение в теорию квантовых полей, 4 изд., М., 1984; Боголюбов Н. Н., Медведев В. В., Далецкий М. К., Вопросы теории дисперсионных соотношений, М., 1958; Шерман Г. Ч. И. Я., Развитие последних сечений взаимодействия нуклонов и антинуклонов при больших энергиях, «ИЭФЭФ», 1958, т. 34, с. 725; Дирак П. А. М., Принципы квантовой механики, пер. с англ., 2 изд., М., 1979, гл. 3; Барендрект Я. В. В., Дирихлевы свойства элементарных частиц и теория матрицы рассеяния, «УФН», 1962, т. 76, с. 25; Новиков Ю. В., Введение в теорию элементарных частиц, М., 1972; Лоргушов А. А., Местияришвили М. А., Хрусталев В. В., Анализ влияния на поперечные сечения упругих и неупругих процессов при высоких энергиях, «ФЧЯИ», 1972, т. 3, с. 515; Боголюбов Н. Н., Владыкин И. В. С., Тавхелидзе А. Н., Об автоматической асимптотике в квантовой теории поля, «ИМФФ», 1972, т. 12, с. 305; Тодоров И. Т., Аксиоматический подход в квантовой теории поля, в кн.: Междугородная зимняя школа теоретической физики при ОИИ, Дубна, 1964; Медведев В. В., Павлинов М. К., К аксиоматическому построению матрицы рассеяния, там же; Файнберг В. Я., Уравнения квантовой теории поля в аксиоматическом подходе, там же; Меркурьев С. П., Фаддеев Л. Д., Квантовая теория рассеяния для систем нескольких частиц, М., 1965.

В. В. Медведев, М. К. Павлюков.  
**МАТРИЧНЫЕ МЕТОДЫ** в оптике — использование матриц для описания поведения параксимальных (с малыми углами наклонов) световых пучков в оптич. системах с круговой симметрией, включающих элементы из однородной либо «линозодобной» среды с плоскими или сферическими поверхностями. Преобразованные поперечных координат  $x, y$  и углов наклона  $\alpha_x, \alpha_y$  лучей при прохождении через любую систему описывается лучевой матрицей

$$M = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix},$$

элементы  $k$ -рой  $A, B, C, D$  однозначно связаны с такими характеристиками оптич. системы, как фокусное расстояние  $f$  и положение гл. плоскостей (в частности,  $C = -1/f$ ).

Если координаты и углы наклона луча на входной плоскости оптич. системы придать индекс «1», а на выходной плоскости индекс «2», то преобразование луча запишется в виде

$$\begin{vmatrix} x_2 & y_2 \\ \alpha_{x2} & \alpha_{y2} \end{vmatrix} = M \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ \alpha_{x1} & \alpha_{y1} \end{vmatrix} \quad (1)$$

или

$$\begin{vmatrix} x_2 \\ \alpha_{x2} \end{vmatrix} = M \begin{vmatrix} x_1 \\ \alpha_{x1} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} y_2 \\ \alpha_{y2} \end{vmatrix} = M \begin{vmatrix} y_1 \\ \alpha_{y1} \end{vmatrix}.$$

Входная и выходная плоскости всегда считаются расположенными в среде с показателем преломления  $n = 1$  (при необходимости рассмотрены траектории лучей внутри среды с  $n \neq 1$  — в местах ввода/вывода её разрезов). Из (1) видно, что проекция траектории луча на две взаимно перпендикулярные осевые плоскости могут рассматриваться независимо друг от друга в едиобразно.

Если имеется  $m$  оптич. систем, расположенных так, что выходная плоскость системы с матрицей  $M_1$  совмещена со входной плоскостью системы, обладающей матрицей  $M_2$  и т. д. вплоть до системы с матрицей  $M_m$ , то прохождению всех их совокупности соответствует матрица  $M_m \times M_{m-1} \times \dots \times M_2 \times M_1$ . Это позволяет рассчитывать матрицы сложных оптич. систем, исходя из анализа матриц входящих в них элементов.

Любая оптич. система указанного выше класса может быть разбита на простейшие элементы всего двух типов — тонкие линзы и участки однородной среды. Матрица тонкой линзы с фокусным расстоянием  $f$  имеет элементы  $A = D = 1, B = 0, C = -1/f$ ; матрица участка длиной  $l$  однородной среды с показателем преломления  $n$  состоит из элементов  $A = D = 1, C = 0, B = l/n$ . Участок «линозодобной» среды, т. е. среды, показатель преломления  $k$ -рой меняется как  $n = n_0 + n_2(x^2 + y^2)$ , может быть представлен в виде набора изсекающих тонких слоев однородной среды, разделенных линзами. Матрица такого участка состоит из элементов  $A = D = \text{ch}(l\sqrt{2n_2/n_0}), B = \text{sh}(l\sqrt{2n_2/n_0})/\sqrt{2n_2/n_0}, C = 2n_2/n_0$  ( $l$  — длина участка).

Поскольку определители матриц простейших элементов равны единице, то у лучевых матриц любых оптич. систем  $AD - BC = 1$ .

$$M^{-1} = \begin{vmatrix} D & -B \\ -C & A \end{vmatrix}.$$

Если считать, что при движении назад по тому же лучу все его координаты остаются прежними, данная матрица описывает прохождение света через ту же систему в обратном направлении. Чаще, однако, заменяют анаки углов наклона на противоположные, тогда матрица прохождения системы в обратном направлении приобретает вид

$$\begin{vmatrix} D & B \\ C & A \end{vmatrix}.$$

Эти же самые матрицы используются и в скалярном приближении теории дифракции для нахождения функции отклика системы (*Грина функции*). Поле при этом считается монохроматическим стационарным с комплексной амплитудой  $u$ , действует часть  $k$ -рой равна  $\text{Re}\{i\exp(-i\omega t)\}$ . Распределение амплитуды  $u(x_2, y_2)$  на выходной плоскости системы при известном распределении  $u(x_1, y_1)$  на входной и в отсутствие потерь света из-за наличия непреломляемых преломляющих поверхностей, диафрагм и т. п. находит по ф-ле

$$u(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda B} \iint u(x_1, y_1) \exp(ikL_{12}) dx_1 dy_1, \quad (2)$$

$$L_{12} = L_0 + \frac{1}{2B} [A(x_1^2 + y_1^2) + D(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1 x_2 + y_1 y_2)]. \quad (3)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны в вакууме ( $n = 1$ ),  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $L_0$  — измеренное вдоль оси оптич. расстояние между входной и выходной плоскостями системы,  $A, B, D$  — элементы её лучевой матрицы. Величина  $L_{12}$  представляет собой *эквивалент* — оптич. расстояние между точками  $(x_1, y_1)$  на входной плоскости и  $(x_2, y_2)$  на выходной, измеренное вдоль проходящего через эти точки луча, распространяющегося по законам геом. оптики.

Если входная и выходная плоскости оптич. системы сопряжены, то  $B = 0$ , тогда (2) заменяется соотношением

$$u(x_2, y_2) = D \exp\{ik[L_0 + CD(x_1^2 + y_1^2)/2]\} \cdot u(x_1, y_1) \begin{vmatrix} x_2 = Dx_1; \\ y_2 = Dy_1 \end{vmatrix}$$

в этом случае входное распределение поля воспроизводится на выходной плоскости с увеличением  $1/D = A$ , с изменением интенсивности и дополнит. фазовым множителем.

В качестве примера использования М. м. найдём распределение поля в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием  $f$  по распределению  $u(x_1, y_1)$  непосредственно перед линзой. Оптич. система, состоя-

щия в данном случае из линзы и участка пространства длиной  $f$ , имеет матрицу

$$\begin{vmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1/f & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & f \\ -1/f & 1 \end{vmatrix};$$

тогда из (2) следует, что

$$u(x_2, y_2) = \frac{1}{\sqrt{\lambda f}} \exp \left\{ ik \left[ L_0 + (x_2^2 + y_2^2)/2f \right] \right\} \times \\ \times \iint u(x_1, y_1) \exp \left[ -ik(x_1 x_2 + y_1 y_2)/f \right] dx_1 dy_1.$$

Видно, что искомое распределение с точностью до висящего из-под интеграла фазового множителя является *фурье-образом* исходного распределения.

М. м. особенно широко используются в теории *оптических резонаторов* для составления интегральных уравнений, к-рым удовлетворяют поля мод резонаторов, и для описания эволюции рождающихся во многих резонаторах пучков с «самовоспроизводящейся» (сохраняющей свою форму при распространении) структурой, простейшим из к-рых является гауссов. Распределение поля гауссова пучка ширины  $w$  с радиусом кривизны волнового фронта  $r$  пропорционально

$$\exp \left[ -(x^2 + y^2)/w^2 \right] \exp \left[ ik(x^2 + y^2)/2r \right] = \\ = \exp \left[ ik(x^2 + y^2)/2\bar{\rho} \right],$$

где  $\bar{\rho}$  — т. н. комплексный радиус кривизны, определяемый соотношением

$$\frac{ik}{2\bar{\rho}} = \frac{ik}{2\rho} - \frac{1}{w^2}.$$

Подстановка этого распределения в (2) показывает, что гауссов пучок с исходным  $\bar{\rho}_1$  по прохождению любой оптич. системы остается гауссовым, имея на выходе системы

$$\bar{\rho}_2 = (A\bar{\rho}_1 + B)/(C\bar{\rho}_1 + D); \quad (4)$$

ф-ла (4) обычно наз. «законом ABCD».

Соотношения (2) — (4), описывающие прохождение пучка света через оптич. системы с учётом дифракции, остаются справедливыми и в тех случаях, когда оптич. система содержит гауссовы диафрагмы с амплитудным пропусканием, пропорциональным  $\exp[-(x^2 + y^2)/w_0^2]$ , либо участки «линзоподобной» среды с комплексным  $n_2$  (что соответствует наличию поглощения или усиления, квадратично зависящего от поперечных координат). Матрица системы при этом вычисляется по обычным правилам с подстановкой матриц гауссовых диафрагм вида

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 2ik^{-1}w_0^{-2} & 1 \end{vmatrix}$$

и матриц участков «линзоподобной» среды с комплексным показателем преломления, для к-рых остаются справедливыми прежние ф-лы при условии подстановки в них комплексного  $n_2$ . Поскольку эти матрицы комплексны, комплексной становится и матрица оптич. системы, включающей такие элементы, полностью теряя свой геом. смысл; чтобы это подчеркнуть, комплексные матрицы, в отличие от лучевых, нередко наз. в о. н. о. в. м. матрицами. Теряя экстремальные свойства, перестаёт быть оптич. расстоянием и величина, определяемая ф-лой (3); в подобных случаях её наз. комплексным эквивалентом. Аналогичный матем. аппарат с матрицами  $4 \times 4$  используется как в геом., так и в дифракц. приближениях для систем с астигматич. элементами.

М. м. применяются также для описания преобразования поляризации. характеристик света при его прохождении через системы, содержащие двулучепреломляю-

щую среду, поляризаторы и т. п. (см. *Джоанс матричный метод* и *Мюллера матрица*).

Лит.: Джеррард А., Бёрч Дж. М., Введение в матричную оптику, пер. с англ., М., 1978; Ананьев В. Ю., А. А., Оптические резонаторы и лазерные пучки, М., 1980.

**МАТРИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ** в квантовой механике — элемент матрицы представлений *оператора*, взятый а определ. представлении (см. *Представлений теория*). Амплитуды квантовых переходов между начальными и конечными состояниями физ. системы определяются в общем случае матричными элементами  $S$ -матрицы (см. *Матрица рассеяния*). В теории возмущений амплитуды переходов выражаются через М. э. оператора энергии возмущения (см. *Возмущений теория*). Вероятности переходов пропорциональны квадратам соответствующих М. э.

**МАТТИСЕНА ПРАВИЛО** [установлено Л. Маттиессеном (L. Matthiessen) в 1864] — эмпирич. правило, к-рое состоит в том, что общее сопротивление кристаллич. металлич. образца  $\rho(T)$  есть сумма сопротивления  $\rho_{\Phi}(T)$ , обусловленного рассеянием электронов проводимости на тепловых колебаниях решётки (фононах), и сопротивления  $\rho_0$ , связанного с присутствием в металле примесных атомов и др. дефектов кристаллич. решётки:  $\rho(T) = \rho_{\Phi}(T) + \rho_0$ . Величина  $\rho_{\Phi}$  обращается в 0 при  $T = 0$  К,  $\rho_0$  определяет т. н. остаточное сопротивление *металла* при  $T = 0$  К. Сопротивление  $\rho_0$  представляет собой столь чувств. характеристику совершенства образца, что чистоту металла определяют величиной  $r = R_{\text{вк}}/R_{\text{Л.э.к}}$ . Для чистых Cu и Al достигается  $r > 10^5$ , однако для нек-рых металлов  $r < 10^3$ . Согласно *Блоха — Гроновейза формуле*, рассеяние электронов на фононах приводит к зависимости  $\rho_{\Phi}(T) \sim T$  при  $T \gg \theta_{\text{Д}}$  и  $\rho_{\Phi}(T) \sim T^2$  при  $T \ll \theta_{\text{Д}}$ , где  $\theta_{\text{Д}}$  — *Дебая температура*. Однако при низких темп-рах наблюдается более сложная зависимость. Напр., для Al  $\rho \sim T^3$  при  $T = 8 \div 20$  К, для K  $\rho \sim e^{-20/T}$  при  $T = 2 \div 6$  К, для Li  $\rho \sim T^2$  при  $T = 1 \div 40$  К, для Ag  $\rho \sim T^4$  при  $T = 2 \div 7$  К, для Cu и Au  $\rho \sim T^4$  при  $T = 3 \div 7$  К.

М. н. справедливо, если процессы решётчного и примесного рассеяния независимы и изотропны. В действительности необходимо учитывать корреляции между ними. Значит, отклонение от М. в. связано с зависимостью  $\rho_{\Phi}(T)$  в области низких темп-р. Такие отклонения происходят по нек. причинам: 1) примесь вносит локальное искажение решётки, что приводит к неупругому рассеянию электронов на квазилокальных и локальных колебаниях решётки; 2) примесь часто влияет на упругие константы, соответственно меняется и колебат. спектр решётки; 3) примесь действует на зонную структуру, сдвигая уровень Ферми, изменяя *плотность состояний* и *эффективную массу* носителей заряда; 4) нек-рые дефекты, напр. *дислокации*, рассеивают анизотропно; 5) неупругость столкновений электронов особенно существенна в металлах с развалёнными магн. примесями, т. к. обуславливает *Лондо эффект*. Это приводит к минимуму в зависимости  $\rho(T)$  при низких темп-рах.

Лит.: Лифшиц И. М., Азбелев М. Я., Каганов М. И., Электронная теория металлов, М., 1971; Влатт Ф., Физика электронной проводимости в твердых телах, пер. с англ., М., 1971; Dingle J. S., The electrical properties of metal and alloys, L., 1977; Кучер М., Уилер Н., Electron-electron scattering in conducting materials, «Adv. Phys.», 1984, v. 33, p. 257; Уилер Н., The electrical resistivity of the simple metals, «Contemp. Phys.», 1984, v. 25, p. 211.

**МАТЬЕ ФУНКЦИИ** — специальные ф-ции типа удволяющих дифференц. ур-ний

$$d^2u/dz^2 + (a + b \cos 2z)u = 0 \quad (1)$$

(ур-ние Матье, частный случай *Хилла уравнения*), к-рое получается при разделении в эллиптич. координатах переменных в *Гельмгольца уравнении*, стационарном ур-нии Шрёдингера и в матом. моделях

разл. колебат. систем с симметрией эллипса. Введён Э. Матьё (E. Mathieu) в 1868.

Единого определения и единых обозначений для М. ф. не существует. Обычно под М. ф. (1-го рода) понимают периодические (с периодом  $2\pi$ ) решения ур-ния (1), удовлетворяющие граничным условиям

$$u(0) = u(\pi) = 0 \quad (2)$$

[нечётные М. ф., обозначаемые  $se_n(x)$ , где  $n = 1, 2, \dots$  — число нулей на интервале  $0 \leq x < \pi$ ] или

$$\left. \frac{du}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{du}{dx} \right|_{x=\pi} = 0 \quad (3)$$

[чётные М. ф., обозначаемые  $ce_n(x)$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$  — число нулей на интервале  $0 \leq x < \pi$ ]. При  $b \rightarrow 0$  эти ф-ции сводятся к тригонометрическим.

М. ф. существуют лишь в том случае, когда точка  $(a, b)$  в пространстве параметров ур-ния (1) лежит на границе зоны устойчивости, внутри к-рой решения ур-ния (1) ограничены. Граничные условия (2) и (3) определяют М. ф. с точностью до множителя, к-рый можно задать, выбрав надлежащие условия нормировки, напр.

$$ce_n(0) > 0, \quad \int_0^\pi ce_n^2(x) dx = \pi,$$

$$\left. \frac{dce_n}{dx} \right|_{x=0} > 0, \quad \int_0^\pi se_n^2(x) dx = \pi.$$

Менее распространены М. ф. 2-го рода — непериодические решения ур-ния (1), обозначаемые  $fe_n(x)$  и  $ge_n(x)$ .

М. ф. можно получить и как решения интегрального ур-ния; они удовлетворяют соотношениям ортогональности, вытекающим из ур-ния (1) и граничных условий (2) и (3):

$$\int_{-\pi}^{\pi} ce_m(x) ce_n(x) dx = 0, \quad m \neq n;$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} se_m(x) se_n(x) dx = 0, \quad m \neq n;$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} ce_m(x) se_n(x) dx = 0.$$

М. ф. допускают разложение в ряды Фурье

$$ce_m(x) = \sum_{r=0}^{\infty} A_{mr} \cos rz,$$

$$se_m(x) = \sum_{r=0}^{\infty} B_{mr} \sin rz$$

(суммирование по чётным  $r$  для чётных  $m$  и по нечётным  $r$  для нечётных  $m$ ), а также в ряды по ф-циям Бесселя и произведениям ф-ций Бесселя.

Модифицированные М. ф. (1-го рода) определены как

$$Ce_n(x) = ce_n(ix), \quad Se_n(x) = -ise_n(ix),$$

они удовлетворяют ур-нию, к-рое получается из ур-ния (1) при замене  $\cos 2z$  на  $\cosh 2z$  (модифициров. Ур-ние Матьё).

Лит.: Уиттенбер Э. Т., Ватсон Д. Н. Курс современного анализа. Пер. с англ. т. 2. 2-е изд. М.: 1963; Мак-Ланглан А. В. Теория и приложения функций Матьё, пер. с англ. М.: 1953; Вейтмен Г. Эрдейи А., Высшие трансцендентные функции, пер. с англ. (т. 3). М.: 1967.

Кл. А. Демков.  
**МАХА КОНУС** — конус, поверхность, ограничивающая в сверхзвуковом потоке газа область, в к-рой

сосредоточены звуковые волны (возмущения), исходящие из точечного источника возмущений  $A$  (рис.). В однородном сверхзвуковом потоке газа угол  $\alpha$  между образующими М. к. и его осью наз. углом Маха; он связан с Маха числом  $M$  соотношением  $\sin \alpha = 1/M$ . Поверхность М. к. является отбояющей системы звуковых волн, распространяющихся от источника возмущений.



**МАХА ЧИСЛО** — один из критериев подобия в механике жидкости и газа. Представляет собой отношение скорости течения  $v$  в данной точке газового потока к местной скорости распространения звука  $a$  в движущейся среде —  $M = v/a$  (назв. по имени австр. учёного Э. Маха (E. Mach)).

М. ч. является мерой влияния сжимаемости среды, т. е. относит. изменения её плотности  $\Delta \rho/\rho$  под действием всесторонних сил давления  $p$ . Из законов термодинамики следует, что  $\Delta \rho/p$  пропорционально  $\Delta p/p$ , а из Бернулли уравнения —  $\Delta p \sim v^2$ , поэтому  $\Delta \rho/\rho \sim \Delta p/p \sim v^2/p$ . Т. к. скорость распространения звука  $a \sim \sqrt{p/\rho}$ , то  $\Delta \rho/\rho \sim v^2/a^2 = M^2$ , т. е. относит. изменение плотности в газовом потоке  $\sim M^2$ .

В несжимаемой жидкости  $\alpha \rightarrow \infty$  и  $M \rightarrow 0$ . С ростом М. ч. влияние сжимаемости усиливается. Напр., если считать газ несжимаемой жидкостью, то уже при скорости, соответствующей  $M = 0,2$  ( $v = 240$  км/ч при полёте в воздухе вблизи поверхности Земли), давление будет вычислено с ошибкой в 1%, плотность — с ошибкой в 2%; при  $M = 1$  эти ошибки возрастут соответственно до 25% и 50%. Если движение газа неустойчивое, сжимаемость может оказывать заметное влияние при очень малых скоростях движения частиц газа (напр., при распространении звуковых волн).

Величина М. ч. принята за основу классификации течений газа: при  $M \rightarrow 0$  газ можно считать несжимаемым, при  $M < 1$  течения наз. дозвуковыми, при  $M \approx 1$  — околозвуковыми, при  $M > 1$  — сверхзвуковыми и при  $M > 5$  — гиперзвуковыми.

Наряду с М. ч. используются и др. характеристики безразмерной скорости течения газа: коэф. скорости

$$\lambda = v/v_{кр} = \sqrt{\frac{\gamma+1}{2}} M \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-1/2}$$

и безразмерная скорость

$$\Lambda = v/v_{\max} = \sqrt{\frac{\gamma-1}{2}} M \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-1/2},$$

где  $v_{кр}$  — критическая скорость,  $v_{\max}$  — макс. скорость в газе,  $\gamma = c_p/c_v$  — отношение уд. теплоёмкостей газа при постоянных давлении и объёме соответственно.

М. ч. связано с др. подобия критериями — Эйлера числом  $Eu$ , Рейнольдса числом  $Re$  и Кнудсена числом  $Kn$  соотношениями  $Eu = 2/\gamma M^2$ ,  $Kn = M/Re$ .

В акустике к пользуются М. ч.  $M_a = v/a$ , или  $M^2 = \Delta p/\rho$  (где  $v$  — амплитуда колебательной скорости частиц в звуковой волне,  $\Delta p$  — избыточная плотность, обусловленная проходящей волной) для характеристики стенки возмущения среды, вызванного распространением в ней звуковой волны. Поскольку предметом изучения акустики являются процессы, в к-рых возмущения среды малы, соответственно малы и значения М. ч. ( $M_a \ll 1$ ); это условие является количественным критерием применимости акустич. предположений. Напр., для звука в воздухе, интенсивность которого соответствует громкому разговору,  $M_a \approx 10^{-4}$ . С. П. Высокоский.

**МАЯТНИК** — твёрдое тело, совершающее под действием приложенных сил колебания около неподвижной точки или оси. В физике под М. обычно понимают



М., совершающий колебания под действием силы тяжести. Простейший М. состоит из небольшого массивного груза  $C$ , подвешенного на нити (или лёгком стержне) длиной  $l$ . Если считать нить нерастяжимой и пренебречь размерами груза по сравнению с длиной нити, а массой нити по сравнению с массой груза, то груз на нити можно рассматривать как материальную точку, находящуюся на неизменном расстоянии  $l$  от точки подвеса  $O$ . (рис. 1, а). Такой М. наз. круговым маятн. М. Если,

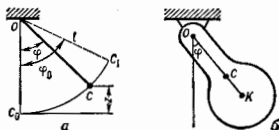


Рис. 1.

будет описывать горизонтальную окружность (к о н и ч е с к и й М., рис. 2, б). Из невруговых М. осо-

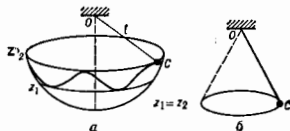


Рис. 2.

бий интерес представляет *цимайдальный маятник*, колебания к-рого изохронны при любой величине амплитуды.

**Физический маятник.** Физ. М. обычно наз. твёрдое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг горизонтальной оси подвеса (рис. 1, б). Движение таково М. вполне аналитично движению кругового маятн. М. Период конечных или малых колебаний физ. М. определяется соответственно ф-лами (2) или (3), в к-рых  $l$  следует заменить величиной  $l_0 = I/m a = a + r_c^2/a$ , где  $m$  — масса М.,  $a$  — расстояние от центра тяжести  $C$  до оси подвеса,  $I$  — момент инерции М. относительно оси подвеса,  $r_c$  — радиус инерции относительно оси, параллельной оси подвеса и проходящей через  $C$ . Период зависит от положения оси подвеса относительно центра тяжести и будет наименьшим при  $a = r_c$ . Величина  $l_0$  к-рая всегда больше  $a$ , вдоль приведённой дилкой физ. М. Если отложить вправо линии  $OC$  отрезок  $OK = l_0$ , то полученная точка  $K$  наз. центром качаний физ. М. (маятн. М. с мас-сой, сосредоточенной в точке  $K$ , будет колебаться с тем же периодом, что и данный физ. М.). Точка оси подвеса  $O$  и центр качаний  $K$  обладают свойством взаимности: если М. подвесит так, чтобы ось подвеса прошла через  $K$ , то точка  $O$  станет центром качаний и период колебаний М. не изменится. На этом свойстве основано устройство *о б о р о т и о г о М.*, применяемого для определения ускорения силы тяжести.

Свойствами М. широко пользуются в разл. приборах: часах, приборах для определения ускорения силы тяжести (маятниковый прибор), ускорений движущихся тел, колебаний земной коры (сейсмограф), в гироскопах, приборах, приборах для эквипер. определения моментов инерции тел и др.

Лит. см. при ст. *Динамика*. С. М. Тарс.  
**МДП-СТРУКТУРА** (металл — диэлектрик — полупроводник) — структура, образованная пластинкой полупроводника П, слоем диэлектрика Д на одной из её поверхностей и металлик. электродом (автором М., рис. 1). При подаче на МДП-с. напряжения  $V$  в *полу-проводнике* вблизи границы с диэлектриком возникает электр. поле. Оно перераспределяет заряды в полупроводнике, изменяя концентрацию носителей заряда вблизи поверхности, и, следовательно, изменяет электропроводность приповерхностного слоя полупроводниковой пластины (см. *Поля эффект*). Свойства МДП-с. впервые исследовали амер. физики У. Шокли (W. Shockley) и Дж. Л. Пирсон (G. L. Pearson).

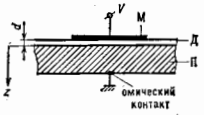


Рис. 1.

Энергет. диаграмма МДП-структуры изображена на рис. 2 с полупроводником л-типа. При  $V = 0$  зоны не изогнуты. Если  $V \neq 0$ , то возникает изгиб зон; здесь возможны три случая. Если  $V < 0$ , то изгиб зон «вверх» (рис. 3, а) приводит к увеличению числа дырок у поверхности полупроводника, т. к. их концентрация  $\propto [-(\epsilon_F - \epsilon_v)/kT]$  ( $T$  — темп-ра). Вблизи поверхно-

как это обычно имеет место, колеблющееся тело нельзя рассматривать как материальную точку, то М. наз. физическим.

**Математический маятник (круговой).** Если М., отклонённый от равновесного положения  $C_0$ , отпустить без нач. скорости или сообщить точке  $C$  скорость, перпендикулярную  $OC$  и лежащую в плоскости нач. отклонения, то М. будет совершать колебания в одной вертик. плоскости (плоский маятн. М.). Если пренебречь трением в оси и сопротивлением воздуха (что в дальнейшем всегда предполагается), то для М. будет иметь место закон сохранения механич. энергии, к-рый даёт:

$$v^2/2g + z = h, \quad (1)$$

где  $v = l dq/dt$  — скорость точки  $C$ ,  $z = l(1 - \cos\varphi)$  — её координата, отсчитываемая вертикально вверх от равновесного положения,  $\varphi$  — угол отклонения М. от вертикали,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $h$  — постоянная, пропорциональная полной механич. энергии М. и определяемая нач. значениями  $v_0$  и  $z_0$ .

Когда сообщённая М. нач. энергия такова, что  $h < 2l$  (для груза на стержне) или  $h < l$  (для груза на нити), то М. будет совершать колебания с угл. амплитудой  $\varphi_0$ , определяемой равенством  $\cos\varphi_0 = 1 - h/l$ . Эти колебания не являются гармоническими; их период  $T$  зависит от амплитуды  $\varphi_0$  и определяется след. ф-лой, получаемой из ур-ния (1):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[ 1 + \left(\frac{1}{4}\right)^2 \sin^2 \frac{\varphi_0}{2} + \left(\frac{1}{64}\right)^2 \sin^4 \frac{\varphi_0}{2} + \dots \right] \quad (2)$$

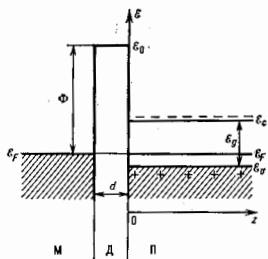
Когда указанные выше условия для  $h$  не выполняются, то М. не совершает колеб. движения. Напр., при  $h > 2l$  груз на стержне будет описывать окружность. Когда сообщённая М. нач. энергия очень мала ( $h \ll l$ ), М. совершает малые колебания, близкие к гармоническим; период малых колебаний можно приближённо считать равным:

$$T = 2\pi \sqrt{l/g}, \quad (3)$$

т. е. не зависящим от амплитуды (колебания изохронны). Ф-ла (3) по сравнению с (2) даёт погрешность до 0,05% при  $\varphi_0 \approx 5^\circ$  и до 1% при  $\varphi_0 \approx 23^\circ$ . Эти результаты справедливы для *инерциальной системы отсчёта*. По отношению к Земле вследствие её суточного вращения плоскость качаний М. медленно изменяет своё направление (см. *Фуко маятник*).

Если отклонённому М. сообщить нач. скорость, не лежащую в плоскости нач. отклонения, то точка  $C$  будет описывать на сфере радиуса  $l$  кривые, заключённые между 2 параллелями  $z = z_1$  и  $z = z_2$ , где значения  $z_1$  и  $z_2$  зависят от нач. условий ( $\epsilon$  ф е р и ч е с к и й М., рис. 2, а). В частном случае, при  $z_1 = z_2$ , точка  $C$

рис. 2. Энергетическая диаграмма МДП-структуры на основе полупроводника р-типа при отсутствии напряжения  $V$  на затворе. Заштрихованы состояния, занимаемые электронами при  $T \rightarrow 0$  К;  $\Phi$  — работа выхода металла;  $\mathcal{E}_0$  — энергия электронов в вакууме;  $\mathcal{E}_c$  — потолок валентной зоны;  $\mathcal{E}_v$  — дно зоны проводимости;  $\mathcal{E}_f$  — уровень Ферми;  $\mathcal{E}_p$  — ширина запрещенной зоны полупроводника.



сти полупроводника формируется слой, обогащенный осв. носителями (см. *Контактные явления в полупроводниках*). При  $V > 0$  зоны изгибаются «вниз» (рис. 3, б) и в приповерхностной области уменьшается число

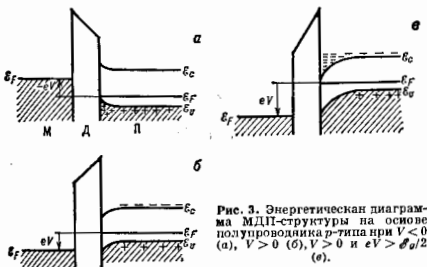


рис. 3. Энергетическая диаграмма МДП-структуры на основе полупроводника р-типа при  $V < 0$  (а),  $V > 0$  (б),  $V > 0$  и  $eV > e_0/2$  (в).

осв. носителей (обедненный слой). При дальнейшем увеличении положения, напряжения зоны изгибаются столь сильно, что середина запрещенной зоны вблизи поверхности опускается ниже  $\mathcal{E}_f$  (рис. 3, в). С этого момента концентрация электронов превышает концентрацию дырок (*инверсионный слой*).

При сильной инверсии, когда дно зоны проводимости  $\mathcal{E}_c$  опускается ниже  $\mathcal{E}_f$  (рис. 4), концентрация электронов в инверсионном слое слабо зависит от темп-

нита до значения  $\Psi_0$  на его поверхности ( $z = 0$ ). При высоких темп-рах и слабой инверсии концентрация электронов  $n$  и дырок  $p$  в слое экспоненциально зависит от  $\Psi$ :

$$n = n_0 \exp(e\Psi/kT), \\ p = p_0 \exp(-e\Psi/kT), \quad (1)$$

где  $n_0$  и  $p_0$  — равновесные концентрации электронов и дырок в объеме полупроводника. При сильной инверсии и понижении темп-ры в инверсионном слое возникает ферминовое вырождение газа электронов (или дырок).

Ёмкость МДП-структуры. Из условия электронейтральности МДП-с. следует, что заряд на металлич. затворе  $Q$  равен сумме заряда в инверсионном слое  $Q_i$  и заряда коинвоцированных акцепторов и доноров в обедненном слое полупроводника

$$Q = Q_i + e(N_a - N_d)W. \quad (2)$$

Здесь  $W$  — толщина обедненного слоя,  $N_a$  и  $N_d$  — концентрации соответственно акцепторов и доноров в объеме полупроводника,  $e$  — элементарный заряд.

Полное напряжение  $V$ , приложенное к МДП-с., распределяется между слоем диэлектрика и слоем пространственного заряда в полупроводнике; МДП-с. можно рассматривать как последоват. соединение 2 конденсаторов. Ёмкость на единицу площади  $C = dQ/dV$  определяется соотношением

$$C = \frac{C_{\text{диэл}} \cdot C_{\text{пл}}}{C_{\text{диэл}} + C_{\text{пл}}},$$

где  $C_{\text{диэл}} = \epsilon/4\pi d$  — ёмкость диэлектрика,  $C_{\text{пл}} = Q/d\Psi$  — дифференц. ёмкость полупроводника.

При  $V < 0$  (режим обогащения) ёмкость  $C_{\text{пл}} \gg C_{\text{диэл}}$  и полная ёмкость  $C$  близка к  $C_{\text{диэл}}$  (рис. 5). При  $V \approx 0$  (обеднение) область

обеднения служит добавочным слоем диэлектрика и ёмкость МДП-с. падает. В области инверсии ( $V > 0$ ) дифференц. ёмкость образовавшегося инверсионного слоя намного превышает ёмкость диэлектрика и  $C \sim C_{\text{диэл}}$ . Это означает, что почти весь заряд, вводимый в МДП-с., при дальнейшем увеличении  $V$  (при сильной инверсии) сосредотачивается в инверсионном слое.

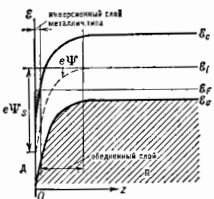
То же самое происходит и при низких темп-рах ( $kT \ll \mathcal{E}_f - \mathcal{E}_v, \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_f$ ), когда проводимость в объеме полупроводника становится исчезающе малой («замораживается»); при изменении  $V$  заряд обедненного слоя не успевает измениться и равновесие между объемом полупроводника и инверсионным слоем практически не устанавливается. В этом случае для изменения заряда инверсионного слоя необходим омический контакт непосредственно с ним. В обоих случаях концентрация носителей заряда в инверсионном слое  $N_s$  линейно связана с  $V$ :

$$N_s = \frac{C_{\text{диэл}}}{e} (V - V_1), \quad (3)$$

где  $V_1 = \text{const}$  — т. н. пороговое напряжение, зависящее от физ. свойств границы диэлектрик — полупроводник.

В реальной МДП-с. вблизи границы раздела существуют связанные электронные состояния, непрерывно распределенные по энергии в пределах запрещенной зоны (обусловленные дефектами кристаллич. решётки, примесными ионами и т. д., концентрирующимися вблизи границы раздела полупроводник — диэлектрик). Переарядка этих состояний при изменении  $V$  может происходить с разл. скоростью, потому что в случае пере-

рис. 4. Участок воиной диаграммы приповерхностной области МДП-структуры (рис. 3, в) в режиме сильной инверсии;  $\mathcal{E}_f$  — середина запрещенной зоны;  $\Psi$  — электростатический потенциал; заштрихованы состояния, занятые электронами при  $T \rightarrow 0$  К.



$T$ , а проводимость  $\sigma$  инверсионного слоя приобретает металлич. характер:  $d\sigma/dT < 0$ . Инверсионный слой отделен от объема полупроводника обедненным слоем, где имеется фиксиров. заряд, связанный с донорами в акцепторами, а концентрация электронов и дырок мала.

Слой пространственного заряда в МДП-структуре. Характеристич. изгиба зон служит электростатич. потенциал  $\Psi$ ,  $x$ -ый изменяется от 0 в объеме полупровод-

меного Уг в. и. воль-фарадые характеристики реальных МДП-с. зависят от его частоты.

**Кремниевая МОП-структура.** Наиб. распространена кремниевая МДП-с., в к-рой слоем диэлектрика служит SiO<sub>2</sub> (МОП-структура, от металл — окисел — полупроводник). Её достоинства — малая концентрация связанных электронных состояний на границе Si — SiO<sub>2</sub> ( $10^{16}$ — $10^{14}$  см<sup>-2</sup>) и высокая электрическая прочность SiO<sub>2</sub>, благодаря чему концентрация носителей может достигать  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Кремниевая МОП-структура является основой МОП-транзисторов — приборов с зарядовой связью. Она является также объектом физ. исследований благодаря тому, что тонкий приповерхностный инверсионный слой представляет собой квантовую двумерную электронную систему с электрически управляемой энергией Ферми (или концентрацией носителей). На МДП-с. были обнаружены и изучаются такие явления, как *аномальная локализация, квантовый Холла эффект, отрицат. магнетосопротивление*, квантовые осцилляции хим. потенциала и др.

Помимо кремниевой МДП-с. используют и пьезоэлектрические МДП-с. на основе Ge, InSb, GaAs и др.

Лит.: 3 и С. Физика полупроводниковых приборов, пер. с англ., кн. 1—2, М., 1984; А вид Т. Фаулер А. С. Терм. Ф. Электрические свойства двумерных систем, пер. с англ., М., 1983.

**МЕГА...** (от греч. mégas — большой); М — приставка для образования наименования кратной единицы, в 10<sup>6</sup> раз большей исходной. Напр., 1 МВт (мегаватт) = = 10<sup>6</sup> Вт.

**МЕДИАНА ВЫБОРОЧНАЯ** (от лат. mediana — средний) — среднее значение упорядоченной выборки случайных величин  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ . М. в. равна среднему случайному числу  $M = x_{(n+1)/2}$ , если  $n$  нечётно, и ср. значению двух последов. средних чисел  $M = (x_{n/2} + x_{(n/2+1)})/2$ , если  $n$  чётно. М. в. является устойчивой оценкой центра распределения и часто более предпочтительна, чем ср. значение выборки, особенно при вычислениях вручную. М. в. часто используется в процедурах сглаживания эксперим. данных.

С. В. Ильченко.

**МЕДЛЕННЫЕ НЕЙТРОНЫ** — нейтроны с кинетич. энергией менее 100 эВ (см. *Нейтронная физика*).

**МЕДЬ** (лат. Cuprum), Cu, — хим. элемент побочной подгруппы I группы периодич. системы элементов, ат. номер 29, ат. масса 63,546. Природная М. содержит два стабильных изотопа: <sup>63</sup>Cu (69,17%) и <sup>65</sup>Cu. Электронная конфигурация двух внеш. оболочек 3d<sup>9</sup>4s<sup>1</sup>. Энергия последов. ионизаций соответственно равны 7,726; 20,291; 36,83 эВ. Металлич. радиус 0,128 нм, радиус ионов Cu<sup>+</sup> и Cu<sup>2+</sup> соответственно 0,098 и 0,080 нм. Значение электроотрицательности 1,75.

М. — мягкий ковкий металл красного цвета, имеет кубич. гранцентриров. структуру с параметром  $a = 0,36148$  нм. Плотность 8,94 г/см<sup>3</sup>,  $t_{пл} = 1084,5^\circ\text{C}$ ,  $t_{кип} = 2540^\circ\text{C}$ , теплота плавления 12,97 кДж/моль, теплота испарения 302 кДж/моль. Обладает высокой теплопроводностью, 401,2 Вт/(м·К) (при 300 К), и малым электрич. сопротивлением,  $1,68 \cdot 10^{-2}$  мОм·м (при 20 °С), уступаая по этим характеристикам только серебру. Температурный коэф. электрич. сопротивления  $4,3 \cdot 10^{-3}$  град<sup>-1</sup>, тернич. коэф. линейного расширения  $1,7 \cdot 10^{-5}$  град<sup>-1</sup>. М. диамагнитна, Тв. по Бриггелло 450—4100 МПа, предел прочности при растяжении ок. 200 МПа, модуль нормальной упругости 118 ГПа (300 К), модуль сдвига 42,4 ГПа.

М. химически малоактивна, степени окисления +1 и +2 (наиб. характерна). В присутствии воды и углекислого газа на поверхности М. образуется зелёная плёнка основного карбоната. Соединения М. иодаты.

Использование М. связано прежде всего с её высокой тепло- и электропроводностью. М. нашла широкое применение в электротехнике, электронике, в разл. токопроводящих устройствах, теплообменниках и т. д. Входит в состав латуны и бронз. Широкое распростра-

нение получают сплавы, содержащие М.: мельхиор (20—30% Ni), нейзильбер (5—35% Ni, 13—45% Zn), константан (40% Ni, 1,5% Mn), конель (43% Ni, 0,5% Mn) и др. Пары М. используют в качестве рабочего вещества в газовых лазерах. Соединения М. Cu<sub>2</sub>Se и Cu<sub>2</sub>Te входят в состав светоизлучит. слоёв солнечных батарей. Из искусственно полученных радиоукладов наиб. значение имеет <sup>64</sup>Cu (электронный захват и β<sup>+</sup>-распад,  $T_{1/2} = 12,704$  ч).

С. С. Вершников.

**МЕЖАТОМНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — взаимодействие атомов, находящихся в одинаковых или разл. энергетич. и зарядовых состояниях. М. в. характеризуется потенциальной апергией (потенциалом взаимодействия)  $V$ , зависящей от взаимного расположения взаимодействующих атомов, в особенности от расстояния  $r$  между их ядрами. При опред. равновесном расстоянии  $r_0$  и не слишком больших кинетич. энергиях свободных атомов в результате М. в. может возникнуть более или менее стабильная хим. связь между атомами, прочность к-рой зависит от вида атомов; её мерой могут служить время жизни молекулы, а также энергия хим. связи.

Наиб. простой случай М. в. — упругое столкновение атомов идеальных газов, к-рое в данной статье рассматриваться не будет (см. *Статистическая физика*). В др. случаях М. в. неоднородно ввиду многообразия условий, в к-рых могут оказаться атомы. Их внутр. энергия может изменяться на десятки эВ только за счёт внеш. воздействий, к-рые способны возмущать и сохранять на какое-то время внеш. электронные оболочки атомов; неск. порядков величины занимают диапазоны газокINETических и поперечных сечений других, более сложных процессов, различия симметрии их пространств. ориентации электронных плотностей их оболочек. Все эти характеристики атомов непосредственно определяют М. в.

М. в. связано в осн. с эл.-статич. и эл.-магн. силами, действующими между атомами. Количественная квантовая теория М. в. потребовала, кроме того, учёта принципа Паули. Т. о., М. в. определяется взаимным расположением и перемещением взаимодействующих атомов и их фрагментов (электронов или распределённых в пространстве электронных оболочек и самих ядер).

Различают химические (или валентные) и физические (невалентные) М. в. К первым относят ковалентные (или гомополярные, обменные или донорно-акцепторные), ионные (или гетерополярные) и металлические М. в. Ко вторым — ван-дер-ваальсовы М. в., включающие эл.-статич. взаимодействия мультиполей, поляризованные (индукционные и дисперсионные), репелитивные магн. и западающие эл.-магн. М. в. По энергетич. и простран. характеристикам, промежуточные между валентным и невалентным М. в., являются М. в., наз. водородной связью. Хим. связи более тем на порядок сильнее физических (соответственно единицы — десятки эВ и десятые доли — единицы эВ). М. в. возбуждённых атомов может приводить к образованию короткоживущих возбуждённых молекул (акимерных молекул). Это пример сильной (~5 эВ), но не прочной, вернее не долгой, связи. Такого типа М. в. иногда носит резонансный характер.

Обычно конкретное М. в. включает в себя в разной степени разл. типы М. в., причём относит. вклад каждого М. в. не всегда удаётся установить; это может быть связано с близкими для них зависимостями  $V$  от  $r$ , напр. для неск. видов М. в. на больших расстояниях  $V \sim r^{-6}$ . Нек-рые из физ. М. в. более характерны для *межмолекулярных взаимодействий*.

**Химические М. в.** Ковалентные М. в. имеет направленный, локализованный и насыщенный характер. При образовании хим. ковалентной связи происходит обобществление и копцентрирование пар электронов на *молекулярной орбитали*, к-рая имеет про-

странств. фиксацию относительно связывающихся атомов. В образованной общей орбитали обобществленные электроны могли первоначально принадлежать обоим атомам (образование  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  и др.) либо, при возникновении донорно-акцепторной связи, только одному из атомов — донору, свободная же орбиталь принадлежит второму атому — акцептору. В качестве доноров или акцепторов могут служить целые группы атомов. Молекулы с ковалентной связью обычно полярные, т. е. имеют пост. электрич. дипольный момент.

В результате обработки разл. рода экспериментов и прямых квантомеханич. расчетов оказалось, что noticeable ковалентных М. в. можно представлять в виде

$$V(r) = \frac{V_0}{m - ar} \left[ \frac{\alpha r_0^{m+1}}{r^{m+1}} + m\alpha(r-r_0) \right], \quad (1)$$

где подгоночные параметры  $\alpha \sim 0,3 \text{ \AA}$ ,  $m = 4$ ; координаты минимума потенциала  $V_0$  и  $r_0$  определяются конкретными взаимодействующими атомами. Первое слагаемое в (1) связано с притяжением, второе — с отталкиванием [В. Гайтлер (W. Heitler) и Ф. Лондон (F. London), 1927].

Иногда М. в. вызвано смещением валентных электронов одного атома (аниона) к другому (катиону), между к-рыми возникает эл.-статич. притяжение. Примеры ионных связей — М. в. в галогенидах щелочных металлов. Эти связи нелокализованные и ненаасыщаемые. Потенциал ионного М. в. определяется ф-лой

$$V(r) = V_0 \frac{nm}{n-m} \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^n - \frac{1}{m} \left( \frac{r_0}{r} \right)^m \right], \quad (2)$$

где  $n = 6-9$ ,  $m = 1$ ; остальные подгоночные параметры зависят от взаимодействующих атомов. Т. к. чисто ионной или ковалентной М. в. не существует, для оценки ионной составляющей в ионно-ковалентной связи вводит параметр электроотрицательность атомов элементов, к-рый определяется полусуммой потенциала ионизации и средства к электрону. Разность электроотрицательностей взаимодействующих атомов примерно равна доле ионной составляющей в М. в.

Металлическое М. в. отличается нелокализанностью, ненаасыщаемостью и ненаравленностью связей и определяется взаимодействием обобществленного электронного газа с ионным остовом кристаллич. структуры. Наиб. выражены М. в. этого типа в кристаллах металлов и сплавов. Потенциал металлич. М. в. определяется выражением

$$V(r) = -\frac{a}{r} + \frac{b_1}{r^2} + \frac{b_2}{r^3} + b_3, \quad (3)$$

где  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  — подгоночные параметры, характеризующие конкретное М. в.

Физические (ван-дер-ваальсовы) М. в. целиком описывают взаимодействие атомов благородных газов, неж-рых органич. соединений и, кроме того, вносят вклад во взаимодействия др. типов. Электрич. взаимодействие мультиполей приводит к т. н. ориент. а д-полю в по м у взаимодействию, описываемому ф-лой

$$V(r) = -\frac{2}{3kT} \frac{d_1^2 d_2^2}{r^6}, \quad (4)$$

где  $d_1$ ,  $d_2$  — дипольные моменты взаимодействующих частей. М. в. не ограничивается взаимодействием лишь диполей.

Однако М. в. с участием квадруполь и мультиполей более высокого порядка малы и обычно ими можно пренебречь (они характерны для межмолекулярного взаимодействия). Примеры взаимодействия мультиполей — М. в. с участием возбужденных атомов и молекул.

Поляризаационное М. в. возникает при поляризац. смещении электронных оболочек взаимодействующих атомов; также М. в. можно рассматривать

как ослабленную форму чисто ионной связи. Поляризац. М. в. подразделяется на индукционные и дисперсионные. Индукц. энергия взаимодействия атомов в осн. состоянии всегда отталкивательно, а в возбужденных электронных состояниях возможны и притяжение, и отталкивание; она определяется ф-лой Дебая — Фальскаггена

$$V(r) = -\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)d_1 d_2}{r^3}, \quad (5)$$

Дисперсионная энергия возникает благодаря чисто квантомеханич. флуктуациям электронной плотности, не имеющим классич. аналога [Уонг (Wong), 1927]. Ф. Лондон (1930) дал общую теорию дисперсионных сил, объяснившую притяжение между атомами благородных газов и отталкивание на коротких расстояниях. Ф-ла для дисперсионной М. в. получается из решения Ур-ния Шрёдингера методом теории возмущений:

$$V(r) = -\frac{3h}{2} \frac{v_1 v_2}{v_1 + v_2} \frac{\alpha_1 \alpha_2}{r^6}, \quad (6)$$

где  $v_1$ ,  $v_2$  — характеристич. частоты возбуждения взаимодействующих атомов. Для сферически-симметричных систем поляризац. энергия определяется статич. поляризуемостями атомов, а дисперсионная — динамич. поляризуемостями или силами осцилляторов квантовых переходов.

Релятивистские магнитные и западаывающие электромгнитные М. в. необходимо учитывать на больших расстояниях между атомами. Вклады этого типа М. в. увеличиваются с ростом массы атомов и при их возбуждении (т. е. при увеличении их размеров и внутр. энергии). Прямой расчёт показывает, что М. в. магн. типа становятся заметными на расстояниях  $\sim (10-100)r_B$  ( $r_B$  — радиус Бора) даже для атомов гелия. Механизм проявления эл.-магн. западаывания объясняется рассогласованием взаимной ориентации диполей за время распространения взаимодействия.

Учёт спиновых взаимодействий, вызывающих сверхтонкое расщепление спектральных линий, также оказывается необходимым на больших расстояниях (для атомов водорода при  $r > 10r_B$ ).

Водородная связь может быть как внутримолекулярной, так и межмолекулярной. Диапазон энергии Н-связей перекрывает весь энергетич. диапазон М. в. и делится на области сильных, средних и слабых Н-связей. Они играют важную роль в биол. соединениях и мн. биохим. процессах. Особенность Н-связи обусловлена тем, что благодаря малому радиусу (на порядок величин меньший, чем радиус др. ионов) нон H<sup>+</sup> способен поаодать в небольшие области между атомами. Напр., связь между молекулами воды определяется через протоны, к-рые одновременно связаны с «собственным» кислородом ковалентной внутримолекулярной связью и с кислородом др. молекулы ионной межмолекулярной связью (рис. 1).

В табл. 1 приведены энергии связи и равновесные расстояния между атомами А и В, H и А при разл. типах М. в. Экзимерные М. в. Атомы инертных газов (и неж-рых др. элементов, напр. Hg) в возбужденном состоянии проявляют свойства, сходные со свойствами атомов щелочных металлов. В частности, они образуют экзимерные молекулы с временем жизни от  $4 \cdot 10^{-10}$  с (для ArF) до  $4 \cdot 10^{-6}$  с (для ArI). Экзимерные образова-

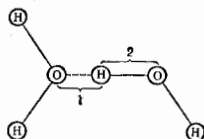


Рис. 1. Схема водородной связи в димере воды: 1 — ионная водородная межмолекулярная связь; 2 — ковалентная связь H — O.

Табл. 1.

Тип межатомного взаимодействия	Энергия взаимодействия, ккал/моль	Равновесное межатомное расстояние, Å	
		AB	HA
Вал-дер-ваальсовое взаимодействие	0,01—0,1	3—4	—
Н-связь:	слабая	3,0—3,5	2,0—2,5
	средняя	5,0—15,0	1,7—2,0
	сильная	20—60	1,4—1,2
Химическая связь	40—200	2,2—2,0	—

ния, включающие атомы галогенов, имеют энергии связи, близкие к соответствующим молекулам. В табл. 2 приведены равновесные расстояния  $r_0$  между атомами и энергии диссоциации  $D$  пек-рых экзимерных молекул и соответствующих им молекул галогенидов щелочных металлов.

Табл. 2.

Молекулы	$r_0$ , Å	$D$ , эВ
K <sup>+</sup> F <sup>-</sup>	2,27	5,54
RbF	2,27	5,80
Xe <sup>+</sup> F <sup>-</sup>	2,49	5,30
CaF	2,35	5,66
Xe <sup>+</sup> Cl <sup>-</sup>	2,94	4,53
CaCl	2,91	4,87
Xe <sup>+</sup> Br <sup>-</sup>	2,96	4,30
CaBr	3,07	4,71
Xe <sup>+</sup> I <sup>-</sup>	3,31	4,08
CaI	3,35	4,39

Табл. 3.

Система	$V_0$ , мэВ	$r_0$ , Å
H—He	0,46	3,6
H—Ne	2,82	3,18
H—Ar	4,80	3,56
H—Kr	6,98	3,70
H—Xe	6,51	3,95
He—He	0,93	2,965
Ne—Ne	3,62	3,102
Ar—Ar	12,16	3,76
Kr—Kr	17,00	4,03
Xe—Xe	24,20	4,36

В экзимерной молекуле  $Ag_2F$  атомы связаны одновременно по ионному (фтор и возбужденный аргон) и по ковалентному (атомы фтора) типам хим. связи.

К экзимерным М. в. следует отнести и резонансные М. в. между одинаковыми атомами, один из к-рых возбужден и поэтому имеет деформированную электронную оболочку. Резонансные М. в. обусловлены особенностями деформаций плотностей электронных оболочек взаимодействующих атомов. Большое число существующих разл. представлений потенциалов М. в. (только для упругих М. в. их имеется неск. десятков) лишь частично удовлетворяет практике, т. к. ни одна из предложенных ф-л не универсальна. Различные  $V(R)$  имеют зону применимости либо по типам атомов, либо по расстояниям между ними, либо они привязаны к определен. типу первичной экзимер. информации. Значения параметров  $V$  вычисляются методом подгонки, обеспечивающей наилучшее согласие с выбранной матем. моделью явления.

Одной из наиб. универсальных оказалась ф-ла коэффициров. потенциала Данама:

$$V(R) = V_0 \left\{ \left[ b_0 \left( 1 - \frac{r_0}{r} \right)^2 \right] \left[ 1 + \sum_{n=1}^N b_n \left( 1 - \frac{r_0}{r} \right)^n \right] \right\},$$

где  $V_0$  — глубина потенциальной ямы;  $r_0$  — равновесное расстояние  $r$ , соответствующее минимуму  $V$ ;  $b_0, b_n$  — подгоночные параметры. Имеется относительно большого устойчивости числовых значений  $V_0$  и  $r_0$  при переходе к разл. представлениям  $V$ . Затруднительность аналитич. аппроксимации  $V$  все чаще вынуждает ограничиваться численным табличным или графич. представлением  $V = V(r)$ , где  $r_1$  — межатомное расстояние и др. координаты взаимного расположения

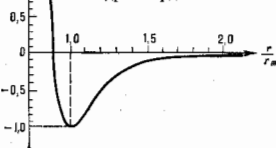


Рис. 2. Безразмерный потенциал взаимодействия симметричных пар атомов благородных газов. Отклонения от закона соответствующих состояний для различных атомов уславляются в различную ширину линии графика.

взаимодействующих атомов. На рис. 2 представлен безразмерный потенциал М. в. одинаковых атомов благородных газов. В таких координатах прекрасно соблюдается закон соответственных состояний. В табл. 3 приведены значения  $V_0$  и  $r_0$  также и для разл. пар атомов.

В реальных атомо-молекулярных образованиях принцип парной аддитивности, при к-рой потенциал М. в. равен сумме парных потенциалов всех участников М. в., строго не выполняется, т. к. заряды нельзя считать точечными, их плотность имеет непрерывное пространственно-временное распределение, возмущающее внеш. и собств. полями. Этот принцип приближительно выполняется лишь для модифициров. парных потенциалов. В этом случае берутся парные потенциалы не изолированных пар взаимодействующих объектов, а их потенциалы в условиях, максимально приближенных к исследуемому. Приближение парного аддитивного потенциала часто используют для оценочных расчетов. Так, на основе аналитич. выражения для потенциала М. в. получены [Дж. К. Максвелл (J. C. Maxwell), Л. Больцман (L. Boltzmann)] явные выражения для коэф. диффузии, теплопроводности, вязкости (см. в ст. Газ), а позднее — коэф. виральных разложений.

Квантовохимич. расчеты реальных (наиб. простых) систем осуществлены с помощью адиабатич. приближения, учитывающего перемещение ядер (более медленное, чем движение электронов). Однако для М. в. атомов, быстро движущихся относительно друг друга, это приближение неприменимо. Адиабатич. приближению справедливо, когда время взаимодействия  $a/v$  ( $a$  — размер системы,  $v$  — скорость относит. перемещения атомов) много больше времени перехода между термич. взаимодействующей системы (параметр Мессе). На больших расстояниях при малых  $v$  для расчета М. в. возбужденных, неполизованных и др. систем иногда используют асимптотич. подход к решению ур-ния Шрёдингера.

Долгое время полагали, что потенциал М. в. зависит лишь от расстояния между взаимодействующими частицами, т. е. размерами самих частиц и их взаимной ориентацией пренебрегали, атомы считали сферически-симметричными. В настоящее время вводится в рассмотрение анизотропные потенциалы М. в., к-рые более актуальны для межмолекулярного взаимодействия, но играют также важную роль для М. в. полиатомов. На рис. 3 приведены зависимости от температуры второго вирального коэфф., контролирующего характер М. в. для поляризованного и неполяризованного  $^3\text{He}$ .

Одно из проявлений анизотропии М. в. — образование молекул и кристаллов. При

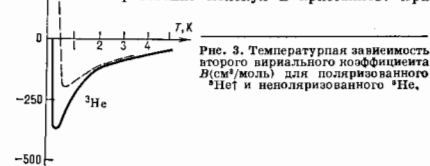


Рис. 3. Температурная зависимость второго вирального коэффициента ( $V_2/\text{моль}$ ) для поляризованного  $^3\text{He}$  и неполяризованного  $^3\text{He}$ .

их вхождении в более сложные системы симметрия отдельных структурных единиц может сохраниться или измениться в зависимости от симметрии их положения в образованных ими молекулах и кристаллах. Эти вопросы разрешаются в соответствии с принципом Кюри и принципом минимума энергии нового образования. Потенциал  $V$  в простейших системах (атомы и ионы водорода и гелия) может быть определен из решения ур-ния Шрёдингера. В подавляющем большинстве случаев  $V$  находится пу-

тём решения т. н. обратных задач по экспериментально найденным величинам, непосредственно зависящим от  $V$ . Наиб. точные значения потенциалов получают с помощью эксперим. данных по рассеянию молекулярных и атомных лучей; значение  $V$  находят также с помощью эмпирических полученных виртуальных коэффициентов, из спектроскопич. данных, из нек-рых модельных расчётов.

Лит.: По г л е н в Г. М., *Interatomic potentials*, N.Y.—L., 1972; Современная кристаллография, т. 2, М., 1979; Д е о н а с В. В., Межмолекулярные взаимодействия и столкновения атомов и молекул, в кн.: Итоги науки и техники. Серия Физика атома и молекулы. Оптика. Магнитный резонанс, т. 1, М., 1980; Ф а н о У., Ф а н о Л., Физика атомов и молекул, пер. с англ., М., 1980; Г а л и ц к и й В. М., Н и к и т я н Е. Е., С м и р н о в Б. М., Теория столкновения атомных частиц, М., 1981; С м и р н о в Б. М., Возбужденные атомы, М., 1982; Д а л о в Ф. и др., Оптическая поляризация лазерного излучения, М., 1985, т. 147, в. 3, с. 433; П о л о в В. К., Мощные эмиттеры лазеры и новые источники когерентного излучения в вакуумном ультрафиолете, там же, с. 587; Е л е н в и й А. В., С м и р н о в Б. М., Физические процессы в газовых лазерах, М., 1985.

Ю. Н. Любимов.

**МЕЖГАЛАКТИЧЕСКИЙ ГАЗ** — газовая компонента заполняющая Вселенную вещества, не входящая в галактики. М. г. наблюдаются в окрестностях (коронах) галактик, скоплениях, сверхскоплениях, цепочках галактик и в больших областях, не содержащих галактик, расположенных между элементами крупномасштабной структуры Вселенной — сверхскоплениями и цепочками галактик.

В коронах галактик (на расстояниях до 100 кпк от галактик) горячий газ с темп-рой  $T \approx (5-10) \cdot 10^8$  К и концентрацией частиц  $n \sim 10^{-2}-10^{-3} \text{ см}^{-3}$  наблюдается по линиям поглощения тяжёлых элементов в оптич. спектрах источников, «протесвечивающих» корону. В нек-рых случаях — по его тепловому радио- и рентг. излучению. Облака нейтрального водорода (HI) в окрестностях галактик обнаружены по радиолинии водорода 21 см (как в излучении, так и в поглощении). Отдельные облака HI регистрируются по поглощению в линии 21 см в спектрах квазаров вплоть до красных смещений  $z \approx 2$ . В скоплениях галактик горячий газ с темп-рой ок.  $10^7$  К и  $n \sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$  обнаружен по тепловому излучению в рентг. диапазоне. Газ, входящий в сверхскопления и цепочки галактик, нагрет до  $T \sim 10^8$  К и наблюдается только по линиям поглощения в спектрах квазаров и других удалённых точечных источников.

В спектрах далёких квазаров наблюдается следы линии поглощения, интерпретируемой как поглощение в водородной линии  $L_{\alpha}$  (смещённой из-за эффекта Доплера) маломассивными газовыми облаками, состоящими из ионизованного водорода с примесью нейтрального. В ряде случаев эта интерпретация подтверждается изучением отдельных участков абсорбционных спектров с разрешением по скоростям до 15–20 км/с. Однофазная компонента нейтрального водорода не наблюдается при  $z < 4$ , и её концентрация не превосходит значения  $10^{-11} (1+z) \text{ см}^{-3}$ . Появились указания на заметный рост концентрации этой компоненты при  $z > 4$ .

М. г. сильно ионизован. Облака нейтрального водорода наблюдаются только в окрестностях галактик. В коронах и скоплениях галактик ионизация связана с высокой темп-рой газа. Газ, расположенный вдали от галактик, вероятно, был ионизован излучением квазаров и молодых галактик в период их образования. При низкой плотности этот газ не успев рекомбинировать и сохранил высокую степень ионизации. В скоплениях и коронах галактик М. г. содержит тяжёлые элементы (вплоть до железа) с относительной концентрацией, прибл. в 10 раз меньшей, чем на Солнце. Это связано с частичным перемешиванием М. г. с внутригалактич. газом. Состав газа вдали от галактик неизвестен.

Согласно оценкам, на долю обычного вещества (барионная компонента) приходится 10–15% массы Вселенной, причём в галактики входит лишь 20–30% барион-

ной компоненты. Остальные 80–70% составляет М. г. Плотность сжимающегося вещества (галактики) определяется по измерениям ср. светимости единицы объёма с учётом ср. наблюдаемой массы — светимость зависимости для галактик. Ср. плотность барионной компоненты оценивается в рамках теории первичного (космологич.) нуклеосинтеза по наблюдаемому обилию  $^4\text{He}$ ,  $^2\text{H}$ , и  $^7\text{Li}$  (см. Космология). Однако эти оценки зависят от принятых моделей и их точность невысока.

Лит.: Cooling Flows in clusters and Galaxies, ed. by A. S. Fabian Dordrecht — [a. o.], 1988.

А. Г. Дорощик.

**МЕЖДОЛИННЫЕ ПЕРЕХОДЫ** — см. в ст. Многодолинные поупроводники.

**МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ШКАЛА (МПТШ-68)** — установлена в 1968 Международным комитетом по мерам и весам, основана на 11 реперных точках (табл.). В МПТШ-68 различают

Основные реперные (постоянные) точки МПТШ-68

Состояние равновесия	Присвоенное значение	
	международные практические температуры	
	$T_{\text{сп}}, \text{K}^*$	$t_{\text{сп}}, ^\circ\text{C}$
Тройная точка водорода	13,81	−259,34
Равновесие между жидкой и газообразной фазами водорода при давлении 3333,0 Па (25/76 нормальная атмосфера)	17,042	−258,108
Точка кипения азота	20,28	−249,87
Точка кипения неона	27,102	−248,048
Тройная точка кислорода	54,361	−218,789
Точка кипения кислорода	90,188	−182,962
Тройная точка воды	273,16	0,01
Точка кипения воды	373,15	100,00
Точка затвердевания цинка	692,73	419,58
Точка затвердевания серебра	1235,08	961,93
Точка затвердевания золота	1337,58	1064,43

\* За исключением тройных точек и одной точки равновесного водорода (17,042 К) присвоенные значения темп-ры действительны для состояний равновесия при давлении 101325 Па (1 нормальная атмосфера).

международную практич. темп-ру Кельвина ( $T_{\text{сп}}$ ) и международную практич. темп-ру Цельсия ( $t_{\text{сп}}$ ):  
 $t_{\text{сп}} = T_{\text{сп}} - 273,15 \text{ K}$ .

Промежуточные точки МПТШ-68 воспроизводятся по интерполяц. ф-лам. В диапазоне между 43,81 К и 630,74 °C (точка затвердевания сурьмы) в качестве эталонного прибора применяют платиновый термометр сопротивления (при  $T < 100$  К используют также германийный термометр), в диапазоне 630,74 °C — 4064,43 °C — термометры с элементами платинородий (10% Rh) — платина выше 1337,58 К (1064,43 °C) — спектральный пирометр с реперной точкой 1064,43 °C. В области высоких темп-р МПТШ-68 доведена до 13,81 К; темп-ры в интервале 0,3–5,2 К определяют по упругости паров жидкого  $^4\text{He}$  (шкала 1958) и жидкого  $^3\text{He}$  (шкала 1962), ещё более низкие — термометрами сопротивления (угольными, из сверхпроводящих сплавов и др.) и магн. методами (см. Низкие температуры).

Темп-ра, определённая по МПТШ-68, в пределах погрешностей измерений совпадает с темп-рой по термодинамич. температурной шкале, принятой в физике за основную.

Лит.: Международная практическая температурная шкала. МПТШ-68, М., 1971.

**МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ** (франц. — *Système International d'Unités*, сокращенное SI, в рус. транскрипции — СИ) — система единиц физ. величин, принятая 11-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1960). М. с. е. разработана с целью замены сложной совокупности систем единиц и отд. внесистемных единиц, сложившейся на основе метрич. системы мер, и упрощения пользования единицами. В СССР введена с 1982 (ГОСТ 8.417–81). Достоинствами СИ являются её универсальность (охватывает все отрасли науки и техники) и согласованность производных единиц,

к-рые образуются по у-р-ниям, не содержащим коэф. пропорциональности. Благодаря атому при расчётах, если выразить значения всех величин в единицах СИ, а ф-лы не требуется вводить коэф., зависящие от выбора единиц.

(В табл. приведены наименования и обозначения (международные и русские) осн., дополнит. и нек-рых производных единиц М. с. е.

## Единицы СИ

Величина	Наименование единицы	Обозначения	
		международное	русское
Основные единицы			
Длина . . . . .	метр	m	м
Масса . . . . .	килограмм	kg	кг
Время . . . . .	секунда	s	с
Сила электр. тока	ампер	A	А
Термодинамич. темп-ра . . . . .	кельвин	K	К
Сила света . . . . .	кандела	cd	кд
Кол-во вещества . . . . .	моль	mol	моль
Дополнительные единицы			
Плоский угол . . . . .	радиан	rad	рад
Телесный угол . . . . .	стерадиан	sr	ср
Производные единицы			
Площадь . . . . .	квадратный метр	m <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>
Объём, вместимость	кубич. метр	m <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>
Частота . . . . .	герц	Hz	Гц
Скорость . . . . .	метр на секунду	m/s	м/с
Ускорение . . . . .	метр на секунду в квадрате	m/s <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>
Угловая скорость	радиан в секунду	rad/s	рад/с
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	rad/s <sup>2</sup>	рад/с <sup>2</sup>
Плотность . . . . .	килограмм на кубич. метр	kg/m <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>
Сила . . . . .	ньютон	N	Н
Давление, механич. напряжение . . . . .	паскаль	Pa	Па
Кинематич. вязкость	квадратный метр на секунду	m <sup>2</sup> /s	м <sup>2</sup> /с
Динамич. вязкость	паскаль-секунда	Pa·s	Па·с
Работа, энергия, кол-во теплоты . . . . .	джоуль	J	Дж
Мощность . . . . .	ватт	W	Вт
Кол-во электрич. заряда	кулон	C	Кл
Электрич. напряже- ние, электродвижу- щая сила . . . . .	вольт	V	В
Напряжённость электрич. поля	вольт на метр	V/m	В/м
Электрич. сопротив- ление . . . . .	ом	Ω	Ом
Электрич. проводи- мость . . . . .	сименс	S	См
Электрич. ёмкость	фарад	F	Ф
Магн. поток . . . . .	вебер	Wb	Вб
Индуктивность . . . . .	генри	H	Гн
Магн. индукция . . . . .	тесла	T	Тл
Напряжённость магн. поля . . . . .	ампер на метр	A/m	А/м
Магнитодвижушая сила . . . . .	ампер	A	А
Энтропия . . . . .	джоуль на кель- вин	J/K	Дж/К
Теплоёмкость удель- ная . . . . .	джоуль на кило- грамм-кельвин	J/(kg·K)	Дж/(кг·К)
Теплопроводность . . . . .	ватт на метр-кельвин	W/(m·K)	Вт/(м·К)
Интенсивность излу- чения . . . . .	ватт на стерадиан	W/sr	Вт/ср
Волновое число . . . . .	единица на метр	m <sup>-1</sup>	м <sup>-1</sup>
Световой поток . . . . .	люмен	lm	лм
Яркость . . . . .	кандела на квад- ратный метр	cd/m <sup>2</sup>	кд/м <sup>2</sup>
Освещённость . . . . .	люкс	lx	лк

Первые три осн. единицы (метр, килограмм, секунда) позволяют образовывать согласованные производные единицы для всех величин, имеющих механич. природу, остальные добавлены для образования производных единиц величин, не сводимых к механическим: ампер — для электрич. и магн. величин, кельвин — для тепловых, кандела — для световых и моль — для величин в области молекулярной физики и химии.

Наименования десятичных кратных и дольных единиц образуются при помощи спец. приставок.  
Литт., Сена Л. А., Единицы физических величин и их размерности, 3 изд., М., 1989; Б у р д у и Г. Д., Справочник по Международной системе единиц, 3 изд., М., 1980; Чер- то в А. Г., Единицы физических величин, М., 1977.

**МЕЖЗВЕЗДНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ** — линейная (реже круговая) поляризация излучения далёких звёзд. Линейная М. п. характеризуется степенью поляризации  $P$  (чаще всего выражается в процентах) и позиционным углом  $\theta$ , задающим плоскость преимуществ. колеба- ний электрич. вектора приходящего излучения (см. *Поляризация света*). Круговая М. п. описывается степе- нью поляризации  $q$  и её знаком, показывающим на- правление вращения электрич. вектора. Эти характе- ристики могут быть выражены через *Стокса парамет-*

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad \text{tg}2\theta = \frac{U}{Q}, \quad q = \frac{V}{I}.$$

Явление линейной М. п. связано с линейным *дипро-* измом межзвёздной среды, обусловленным присутствием в ней несферических ориентированных пылинко. Оно было обнаружено в 1949 У. А. Хилтнером (W. A. Hiltner), Дж. С. Холлом (J. S. Hall) и В. А. Дом- бровским, а к сер. 80-х гг. измерения поляризации проведены для более чем 10 000 звёзд. Позич. углы линейной поляризации  $\theta$  коррелированы в мас- штабах всей Галактики и, по-видимому, достаточно хорошо отражают направления компонента межзвёзд- ного магн. поля, перпендикулярного лучу зрения. Существование связи между направлениями ориента- ции пылинко и магн. полями подтверждается распреде- лением  $\theta$  в спиральных рукавах. Картина, представ- ленная на рис. 1, соответствует ориентации пылинко, при к-рой малые оси несферич. частиц в среднем парал- лельны силовым линиям магн. поля, а их угл. момент процессирует вокруг направления магн. поля.

Для нек-р. сотен звёзд изучена зависимость степени поляризации от длины волны  $\lambda$ . В большинстве случаев зависимость  $P(\lambda)$  достаточно хорошо описывается эмпи- рич. ф-лой К. Серковского (K. Serkowski):

$$\frac{P(\lambda)}{P_{\text{max}}} = \exp \left[ -1,15 \ln^2 \left( \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda} \right) \right],$$

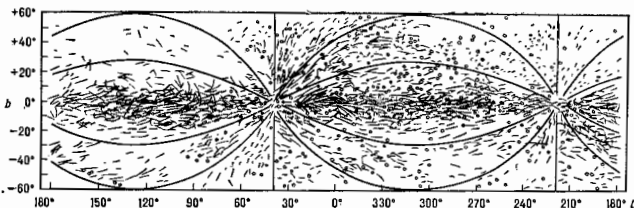
где  $P_{\text{max}}$  — макс. степень поляризации,  $\lambda_{\text{max}}$  — соответствующая длина волны. Величина  $P_{\text{max}}$  состав- ляет 1—3%, иногда достигая 10%. Отношение  $P_{\text{max}}$  к избытку цвета (см. *Астрометрич.*) звёзды  $E_{B-V}$  используют как характеристику поляризующей спо- собности межзвёздной среды в данном направлении. Из анализа данных наблюдений найдено, что  $P_{\text{max}}/E_{B-V} \lesssim 9\%$  ( $E_{B-V}$  — асбидные величины). Значение  $\lambda_{\text{max}}$  для большинства звёзд заключено в пределах от 0,5 до 0,6 мкм, хотя есть звёзды, для к-рых  $\lambda_{\text{max}}$  достигает 0,8 мкм. По данным наблюдений полу- чено соотношение между  $\lambda_{\text{max}}$  и отношением  $R$  полно- го поглощения к селективному (см. *Межзвёздное погло-* щение):  $R \approx 5,6 \lambda_{\text{max}}$  ( $\lambda_{\text{max}}$  в мкм). Найденные в ряде случаев изменения  $\theta$  с длиной волны свидетельствуют о присутствии на луче зрения нек-р. облаков с разл. ориентацией пылинко.

Существование зависимости  $\theta(\lambda)$  обычно сопровож- дается наличием у звёзды ещё и небольшой круговой М. п. Она была открыта в 1972 Дж. Ч. Кемпом (J. Ch. Kemp) и группой под руководством П. Мартина (P. Martin). Круговая М. п. связывается с линейным *двойным* *дипроизмом* межзвёздной среды, при к-ром линейно поляризованное излучение трансформи- руется в эллиптически поляризованное. Круговая М. п. надёжно зафиксирована для двух десятков звёзд. Обыч- но  $q(\lambda) \lesssim 0,02\%$ ; наб. значение получено для про- тозвёздного объекта Беклина — Нейгебауэра в созвездии Ориона,  $q \approx 1,6\%$ ,  $\lambda = 2,2$  мкм (степень элли-

тпчности приходящего излучения  $q/P \approx 0,08$ ). На не-  
кр-рой длине волны  $\lambda_c$  круговая М. п. менеег знак

механизм ориентации может работать в молекулярных  
облаках.

Рис. 1. Распределение меж-  
звездной линейной поляризации  
в Галактике. Длина черточек  
пропорциональна степени на-  
блюдаемой поляризации. Кру-  
жочки обозначены звезды с  
нулевой поляризацией. Дуговые  
линии показывают ход силовых  
линий межзвездного магнитного  
поля, которые, по данным оптиче-  
ской поляризации, сходятся в  
точках с галактическими коор-  
динатами:  $l = 39^\circ$ ,  $b = 0^\circ$  и  
 $l = 219^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ .



(рис. 2). Как правило, это происходит вблизи  $\lambda_{\text{макс}}$ ,  
т. е.  $\lambda_c \approx \lambda_{\text{макс}}$ .

Интерпретацию наблюдений М. п. обычно проводят  
совместно с данными наблюдений межзвездного погло-  
щения. Гладкая зависимость  $P(\lambda)$  и условие  
 $\lambda_c \approx \lambda_{\text{макс}}$  не могут быть  
объяснены, если осн.  
компонентом пыли яв-  
ляются металлы или  
графит. Поэтому обычно  
рассматривают диэлек-  
трич. частицы (сили-

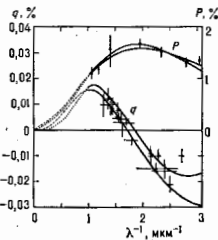


Рис. 2. Наблюдаемые и теоре-  
тические зависимости  $P(\lambda)$  и  $q(\lambda)$  для звезды  $\alpha$  Sco. Кривые—результаты расчетов  
для модели цилиндрических  
частич с ненулевой  
диэлектрической проницаемостью  $m = 1,5$   
(точки) и  $m = 1,5-0,11$   
(штриховые).

катные, ледяные). Зная величину  $\lambda_{\text{макс}}$ , можно оценить  
размер пылевых частиц, а отношение  $P_{\text{макс}}/E_{\text{п.у}}$  позво-  
ляет судить о степени и направлении ориентации пы-  
линок, если известен механизм их ориентации.

Ориентация пылинки может происходить под дейст-  
вием магн. полей, анизотропных потоков газа или  
излучения, однако во всех случаях при наличии даже  
очень слабого магн. поля его направление становится  
и направлением ориентации пылинки. Среди рассмат-  
риваемых механизмов ориентации наиб. популярным дол-  
гое время остается механизм динамич. ориентации пы-  
линок в магн. поле, предложенный Л. Дейвисом (L. Davies)  
и Дж. Л. Гринштейном (J. L. Greenstein) в 1951. В его  
рамках предполагается, что в диэлектрич. частица рав-  
номерно вкруплены атомы железа. Это придает пылин-  
кам парамагн. свойства. Столкновения несферич. пы-  
линок с частицами окружающего газа приводят к её  
вращению с угл. скоростью  $\sim 10^8-10^9$  рад/с. Взаимо-  
действие магн. момента пылевой частицы (он может  
возникать даже у нейтральной вращающейся парамаг-  
ниты пылинки из-за Барнетта эффекта) со слабым  
межзвездным магн. полем ведёт к прецессии угла мо-  
мента пылинки относительно направления магн. по-  
ля. При этом из-за эффекта парамагн. релаксации (см.  
*Парамагнетизм*) тормозится вращение пылинки  
вокруг осей, не совпадающих с направлением поля,  
и пылинки в ср. ориентируются малой осью вдоль на-  
правления магн. поля. Время ориентации пылинки  
вследствие парамагн. релаксации  $\sim 10^7$  лет в облаке  
с темп-рой газа 100К. Однако это время может быть су-  
щественно меньше, если пылинки раскручиваются до  
угл. скоростей  $\sim 10^9$  рад/с. Последнее может быть обу-  
словлено вращением с её поверхности образующихся мо-  
лекулу  $H_2$  («реактивная вертушка» Пёрселла). Такой

Литм.: Д о л г и н о в А. З., Г и с л и н Ю. Н., С и л а н-  
т в а А. В. Распространение и поляризация излучения в мо-  
лекулярной среде, М., 1979; Вош и л л и м о в Н. В. Межзвезд-  
ная пыль, в кн.: Итоги науки и техники. Сер. Исследование  
космического пространства, т. 25, М., 1986. П. В. Вошчичиков.

**МЕЖЗВЕЗДНАЯ ПЫЛЬ** — твёрдые частицы разме-  
ром от тысячных до неск. десятых долей микрона. Рас-  
пределение М. п. в Галактике коррелирует с распреде-  
лением межзвездного газа; отношение содержания (по  
массе) пыли и газа составляет в ср. 0,01.

Пылевые частицы воздействуют на мн. физ. процес-  
сы, происходящие в межзвездной и межпланетной сре-  
де. Их присутствие проявляется как прямо, так и косвенно.  
Пылинки ослабляют излучение далёких звёзд (см.  
*Межзвездное положение*), изменяя его спектраль-  
ный состав и состояние поляризации. Свечение хвостов  
комет, отразительных и диффузных туманностей, а  
также такие явления, как зодиакальный и диффузный  
галактич. свет, в той или иной мере обусловлены излу-  
чением, рассеянным пылью. ИК-излучение нагретых пы-  
левых частиц наблюдается в спектрах планетарных ту-  
манностей, областей III, околозвездных оболочек и  
некр-рых галактик. Наличие пыли может в значит. сте-  
пени видоизменить иониз. структуру туманностей и  
влияет на тепловой баланс межзвездного газа. Как хлад-  
агенту М. п. отводится существен. роль в совр. теориях  
образования звёзд и планет. Наконец, на поверхности  
пылевых частиц могут образовываться нек-рые из моле-  
кул, обнаруженных в межзвездной среде (в частности,  
H<sub>2</sub>). Анализ наблюдательных данных показывает, что в  
межзвездной среде имеются несферич. пылинки суб-  
микронных размеров, состоящие из тугоплавкого ядра  
и оболочки из летучих элементов, а также очень ма-  
ленькие силикатные и углеродные частицы, ответствен-  
ные за поглощение в далёкой УФ-области спектра.

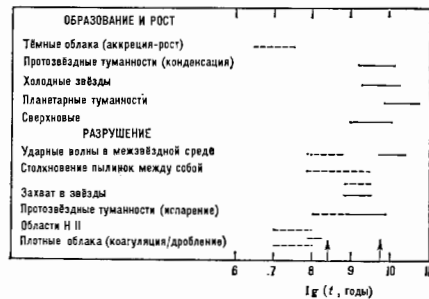
Образование тугоплавких частиц происходит в ре-  
зультате фазовых переходов газ — твёрдое тело, а  
в плотных областях с темп-рами 500—2000 К. Необходи-  
мые условия, по-видимому, существуют во внеш.  
частях атмосфер звёзд-гигантов и сверхгигантов (см.  
*Светимости классов*) холодных спектральных классов,  
оболочках новых и сверхновых звёзд, планетарных ту-  
манностях и в газопо-пылевых сгущениях при воз-  
никновении протозвёзд. В атмосферах холодных звёзд  
сначала образуются очень тугоплавкие зароды-  
шки. Вместе с газом они перемещаются в более высо-  
кие и холодные слои, где проводят меньше времени  
из-за ускорения движения. В этих слоях выпадает в  
твёрдую фазу лишь часть элементов с низкими темп-ра-  
ми конденсации.

В атмосферах т. н. углеродных звёзд возникают  
частицы из графита (или аморфного углерода) и кар-  
бида кремния, а в атмосферах кислородных звёзд —  
силикатные частицы. Размер тугоплавких пылинки мо-  
жет достигать десятых долей микрона. Холодные звёз-  
ды поставляют в межзвездную среду не менее  
10% тугоплавких ядер конденсации, необходимых для



объяснения происхождения М. п. Вклад остальных источников не определен.

В межзвёздных облаках ядра конденсации довольно быстро образуют оболочками из летучих элементов путём физ. адсорбции атомов наиб. распространённых элементов Н, С, N и О. Даже если вероятность прилипания атомов равна всего лишь 0,1, радиус частиц увеличивается до 0,2 мкм за  $10^6$  лет, что может быть меньше ср. времени жизни пылинки. Сублимация является



Одними из характерных времён образования, роста и разрушения межзвёздных пылинок. Сплошными линиями нанесены данные для пылинок, состоящих из тугоплавких веществ, штриховыми — для пылинок, состоящих из летучих веществ. Для сравнения стрелками указаны возраст Солнца (правая стрелка) и период вращения Галактики на расстоянии, соответствующем расстоянию Солнца от галактического центра.

одним из осн. процессов разрушения М. п. при росте её темп-ры. Кроме того, оболочки пылинок, состоящие из летучих элементов, могут испаряться в областях HII. Бомбардировка поверхности пылинок атомами, ионами или молекулами, имеющими большие скорости, приводит к физ. разрушению частиц. Пылинки в межзвёздной среде дробятся в результате столкновений друг с другом со скоростями  $\lesssim 20$  км/с, однако при столкновениях со скоростями  $\lesssim 1$  км/с идёт процесс коагуляции (слипания). Характерные времена образования, роста и разрушения М. п. представлены на рис.

Лит.: М а т т и н Р. G., Cosmic dust, Ожт., 1978; В о ш и н к о в Н. Э., Межзвёздная пыль, в кн.: Итоги науки и техни. Сер. Исследования космического пространства, т. 25, М., 1986.

Н. В. Воиновичко.

**МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА** — материя, заполняющая пространство между звёздами внутри галактик. Материя в пространстве между галактиками наз. межгалактич. средой (см. Скопления галактик, Межгалактический газ). Газ в оболочках вокруг звёзд (околозвёздные оболочки) часто рассматривается вместе со звёздами. Среда в Солнечной системе наз. межпланетной средой. М. с. присутствует во всех галактиках, но в существенно разном кол-ве в зависимости от типа галактик.

Осн. составляющая М. с. — межзвёздный газ, состоящий на 90% (по числу атомов) из водорода. Он довольно равномерно перемешан с межзвёздной пылью, составляющей ок. 1% массы М. с., произв. магн. полями и эл.-магн. излучением (см. Фоновое космическое излучение и Магнитные поля галактик), к-рые также являются компонентами М. с. Все компоненты М. с. тесно взаимосвязаны.

Осн. наблюдат. проявления М. с. — межзвёздное ослабление (экстинкция) света, вызванное поглощением и рассеянием света (см. Межзвёздное поглощение) межзвёздной пылью, межзвёздная поляризация света, межзвёздные линии поглощения, оптич., радио-, ИК- и УФ-излучения светлых туманностей, радиолинии водорода, гелия и др. элементов, радио-, субмиллимет-

ровые, ИК- и УФ-линии молекул в М. с., в т.ч. явление космич. лазеров. ИК-излучение межзвёздных пыли и газа, синхротронное излучение электронов космич. лучей в магн. полях галактик, мерцающая радиация пульсаров на неоднородностях М. с., рентг. и гамма-излучения М. с.

Наиб. плотна М. с. (ок.  $10^{-22}$ – $10^{-23}$  г/см<sup>3</sup> и до  $10^{-18}$ – $10^{-12}$  г/см<sup>3</sup> в конденсациях малого размера) в центрах галактик и вблизи плоскостей спиральных и неправильных галактик. Хотя и в меньших кол-вах, все компоненты М. с. представлены и в др. частях галактик. В М. с. выделяются туманности (в частности, зоны HII), молекулярные облака и т. н. корональный газ, или горячая фаза М. с. (темп-ра  $\sim 10^6$  К).

Плотности энергии кинетич. движений газа (без учёта регулярного вращения вокруг центра галактики), космич. лучей и магн. полей в М. с. примерно равны между собой, вследствие чего М. с. является очень динамичной системой со сложной структурой.

М. с. находится в непрерывном взаимодействии со звёздами и межгалактич. средой, обмениваясь с ними веществом. Из М. с. образуются звёзды (см. Звёздообразование), а вещество, обогащённое тяжёлыми элементами при ядерных реакциях в звёздах, попадает в М. с. Этот процесс — основа хим. эволюции галактик и вообще вещества во Вселенной.

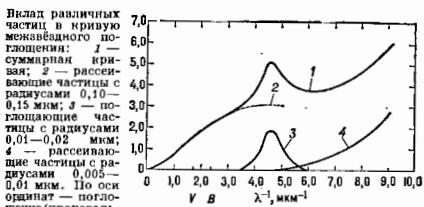
Лит.: К а н т а н С. А., П и к е л ь в е р С. Б., Межзвёздная среда, М., 1963; и т. ж. с Физика межзвёздной среды, М., 1979; Космическая газодинамика, под ред. Х. Дин. Хабипта, пер. с англ., М., 1972; С н и т ц е р Л., Физические процессы в межзвёздной среде, пер. с англ., М., 1981; Б о ч к а р ё в Н. Г., Основы физики межзвёздной среды, М., 1990. Н. Г. Бочкарёв.

**МЕЖЗВЕЗДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ** (межзвёздное ослабление, межзвёздная экстинкция) — результат рассеяния и истинного поглощения света межзвёздной пылью. Характерная особенность М. п. — его селективность (зависимость от длины волны  $\lambda$ ). М. п. вызывает изменение распределения энергии в наблюдаемых спектрах далёких звёзд и др. объектов. Поскольку в сильнейшей части видимой области спектра М. п. больше, чем в красной, оно приводит к межзвёздному покраснению далёких объектов.

Величина М. п. А выражается в *звёздных величинах*. Сравнявая показатели цвета покрасневшей и непокрашеней звёзды одного и того же спектрального класса и светимости класса, находят избыток цвета звёзды, обычно  $E_{B-V}$ , представляющий собой разность поглощений  $A_{B-AV}$  (см. Астрометрия). Для перехода к абс. значению поглощения служит множитель  $R = A_V/E_{B-V}$ . В ср.  $R = 3,1$ , однако в тёмных облаках возможны отклонения в сторону больших  $R$  (до 5–6).

Для построения кривой М. п. (зависимости величины М. п. от  $\lambda$ ) обычно используют звёзды спектральных классов O и B из-за их большой светимости и бедности деталями в спектре. В видимой части спектра ( $\lambda = 0,3$ – $0,9$  мкм) она приблизительно следует закону  $\lambda^{-1}$  и несильно различается в разных областях неба. В ИК- и УФ-частях спектра различия кривых М. п. для отд. звёзд, даже расположенных в одних и тех же участках неба, велики. Частично это объясняется худшей точностью наблюдений в этих диапазонах по сравнению с видимым. В ИК-спектрах сильно покрасневших звёзд обнаружена межзвёздная полоса поглощения вблизи  $\lambda = 9,7$  мкм, приписываемая силикатным пылинкам типа форстерита ( $Mg_2SiO_4$ ) или знетатита ( $MgSiO_3$ ). Эта полоса видна в поглощении в спектрах объектов, погружённых в молекулярные облака, и в аммиции в спектрах ряда звёзд, туманностей и галактик. В спектрах звёзд с  $A_V \geq 5^m$ , как правило, наблюдается полоса поглощения льда на  $\lambda = 3,1$  мкм. В УФ-части кривой М. п. около  $\lambda^{-1} = 4,6$  мкм<sup>-1</sup> обычно выделяется широкий пик; положение его максимума для всех звёзд практически одинаково ( $\lambda_{\max} = 2175 \pm 25$  А), ширина  $\approx 480$  А, высота  $E_{\lambda_{\max}} - 3320A = 5,11 \cdot E_{B-V}$ .

Наблюдения М. п. интерпретируются на основе теории рассеяния света малыми частицами (рис.). М. п. в разных областях спектра находят, учитывая зависимость от  $\lambda$  суммы эфф. сечений поглощения всех частиц в столбе единичного сечения вдоль луча зрения. В видимой и ИК-частях спектра М. п. в осн. обусловлено рассеянием света диэлектрич. частицами, ср. радиус  $k$ -рых  $0,10-0,15$  мкм. Такие пылинки состоят из тугоплавкого (скорее всего, силикатного) ядра и оболочка



из аморфных  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$  и кристаллических атомами железа и др. металлов. Альбедо частиц  $\approx 0,7-0,8$ , а их форма несферическая (на это указывает существование межзвёздной поляризации света). Пик ок.  $\lambda^{-1} = 4,6$  мкм<sup>-1</sup> создаёт углеродные пылинки с радиусами  $0,01-0,02$  мкм и альбедо  $\approx 0,3$ , а дальнейший подъём кривой М. п. к  $\lambda^{-1} = 9$  мкм<sup>-1</sup> вызывают силикатные частицы с радиусами  $0,005-0,01$  мкм и альбедо  $\approx 0,6$ . Форма таких частиц, по-видимому, близка к сферической, а их число в единицах объёма примерно в 1000 раз превышает число пылинки, ответственных з. М. п. в видимой части спектра.

Величина М. п., рассчитанная на единицу расстояния, изменяется в широких пределах в зависимости от направления. В окрестностях Солнца в плоскости Галактики  $A_V \approx 2^m$  кмк<sup>-1</sup>; для создания такого поглощения требуется  $10^8-10^9$  пылевых частиц на луче зрения. С удалением от плоскости Галактики  $A_V$  уменьшается по закону косинуса. Установлена связь между  $A_V$  и числом атомов водорода ( $N_H$ ) на луче зрения,  $A_V = 5,2 \cdot 10^{-22} \cdot N_H$  (в см<sup>2</sup>,  $A_V$  — в звёздных величинах). Это соотношение является численным выражением корреляции распределений газа и пыли, наблюдаемых в Галактике.

В рентг. области спектра излучение в осн. поглощается межзвёздным газом, а межзвёздная пыль вызывает образование газа вокруг комоч. источников рентг. излучения.

Лит.: К а н а з и м С. А., П и к е л ь е р С. Б., Физика межзвёздной среды, М., 1979; В о й н и к о в Н. В., Межзвёздная пыль, в кн.: Итоги науки и техники. Сер. Исследования космического пространства, т. 25, М., 1986.

**МЕЖЗВЕЗДНЫЙ ГАЗ** — осн. компонент межзвёздной среды, составляющий ок. 99% её массы. М. г. заполняет практически весь объём галактик. Наб. изучен М. г. в Галактике. М. г. характеризуется большим разнообразием возникающих в нём структур, физ. условий и протекающих процессов. Темп-ра колеблется от  $4-8$  К до  $10^7$  К и выше, концентрация частиц  $\lambda$  от  $\sim 10^{-4}$  до  $10^{10-12}$  см<sup>-3</sup>. Условиями в М. г. определяется характер *звездобразования*, а следовательно, и эволюции галактик.

Распределение и движение М. г. Наб. бедны М. г. звёздич. (E) галактики. Следы М. г. ( $\lesssim 0,1\%$  от массы галактики,  $M_g$ ) обычно заметны только в гигантских E-галактиках. В линзовидных (SO) галактиках также отмечаются обычно лишь следы М. г. В спиральных (S) галактиках М. г. составляет обычно  $1-10\%$   $M_g$ , точнее, массы, заключённой в сфере с т. н.

хольмберговским радиусом, ограничивающим оптически наблюдаемую часть галактики. В Галактике, являющейся типичной спиральной галактикой, масса М. г.  $\approx 4 \cdot 10^9 M_\odot$  ( $M_\odot \approx 2 \cdot 10^{33}$  г — масса Солнца)  $\approx \approx 2\%$   $M_g$ ; распределена поровну между областями атомарного и молекулярного М. г. В неправильных (I) галактиках масса М. г. обычно превышает 10% от массы галактики.

В E-галактиках М. г. сосредоточен обычно около их центра. В ряде гигантских E-галактик, являющихся радиогалактиками, М. г. присутствует также и на периферии (напр., Cen A, Cyg A). В др. типах галактик М. г. расположен гл. обр. около плоскостей галактик, в слое толщиной порядка сотен парсек, а в S-галактиках также в ядре, являясь непреходящим атрибутом всех активных ядер галактики и квазаров (см. *Объекты с активными ядрами*).

В дисках S-галактик поверхностная плотность ( $\sigma$ ) и объёмная концентрация М. г. чаще всего достигают максимума в кольце на расстоянии от центра галактики ( $R_g$ ) равном неск. кпк (в Галактике — 5 кпк, здесь  $n = 2-3$  кпк<sup>2</sup>,  $\sigma = 10^{21}$  см<sup>-2</sup>), и спадают как внутри, так и снаружи (в последнем случае много медленнее, чем поверхностная яркость; в крупных галактиках следы М. г. видны до  $R_g = 30-50$  кпк и более). В нек-рых галактиках  $\sigma$  нарастает до самого центра. На периферии слой М. г. утолщён до неск. кпк и часто искривлён. Осн. часть М. г. собрана в спиральных ветвях, особенно вблизи их внутр. частей, в виде гигантских газопылевых комплексов. В гало S-галактик М. г. разрежен (в ср.  $n < 10^{-2}$  см<sup>-3</sup>, в Галактике на высоте 5 кпк от её плоскости  $n \approx 3 \cdot 10^{-4}$  см<sup>-3</sup>) и имеет темп-ру  $T \gtrsim 10^4$  К. В него вкраплены более плотный холодный газ, гл. обр. в виде высокоскоростных облаков водорода и планетарных туманностей.

В S- и I-галактиках М. г. вращается вокруг центра вместе со звёздами по траекториям, близким к круговым. На регулярное движение накладываются т. н. пекулярные скорости  $v$  (в ср.  $v = 6-15$  км/с). Возмущения  $v$  при прохождении М. г. через спиральные ветви иногда достигают 100 км/с. В ряде туманностей наблюдаются ещё большие значения  $v$ .

Состав М. г. Распространённость элементов в М. г. примерно такая же, как и в атмосфере звёзд: 90% атомов водорода,  $\approx 10\%$  атомов гелия. Все др. элементы вместе составляют ок. 0,1% по числу атомов (относительное содержание по массе,  $Z \approx 2\%$ ). Однако их роль в М. г. очень велика. По сравнению с составом атмосферы Солнца в М. г. заметен дефицит мн. элементов, особенно Al, Ca, Ti, Fe, Ni, распространённости к-рых понижены в десятки и сотни раз за счёт конденсации их в межзвёздную пыль.

Наблюдается градиент состава М. г. вдоль радиуса галактик. В Галактике  $Z$  изменяется вдоль радиуса с неск. раз. Имеются также градиенты изотопного состава. На регулярный ход состава наложены флуктуации. Неоднородность состава М. г. объясняется хим. эволюцией галактик — обогащением М. г. тяжёлыми элементами, выработанными при ядерных реакциях в звёздах.

Структура, физические условия и динамика М. г. Структура М. г. неоднородна. Он состоит из облаков с разл. массами, размерами и физ. условиями. Наб. крупными образованиями являются, видимо, т. н. сверхоблака размером  $1-2$  кпк, к-рые содержат внутри себя все др. структуры. Около половины массы М. г. в Галактике собрано в  $\approx 5000$  гигантских молекулярных облаков (типичная масса  $\approx 3 \cdot 10^6 M_\odot$ , diam.  $d_{\text{ж}}$   $\approx 50$  кпк,  $n \approx 300$  см<sup>-3</sup>, темп-ра  $T = 10-30$  К), расположенных в слое толщиной менее 100 кпк гл. обр. в кольце с  $R_g = 4-8$  кпк. Вещество их находится в осн. в молекулярной форме. В них найдено ок. 60 раз. молекул (см. *Молекулы в межзвёздной среде*). Преобладают молекулы  $H_2$  (99,99%) и CO (ок. 0,01% по числу молекул).

Имеются более мелкие молекулярные облака (гём-ные и чёрные облака, гигантские глобулы и др. с  $\rho = 10^4 - 10^6 \text{ см}^{-3}$ ,  $T \approx 10 - 20 \text{ К}$ ,  $d \leq 1 \text{ пк}$ ). В молекулярных облаках часто встречаются уплотнения с  $\rho > 10^6 \text{ см}^{-3}$ ,  $T$  — от 4–6 К и более, массой  $M \sim 1 - 100 M_{\odot}$ , вблизи мощных источников энергии — материевой конденсации с  $\rho \sim 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$ ,  $M \sim 10^{-5} M_{\odot}$ . Вблизи горячих звёзд и их групп имеются *зоны III*.

Перечисленные выше области содержат более половины массы М. г., но занимают ок. 0,01% объёма. Около половины объёма М. г. занято областями атомарного водорода (HI), распадающимися на межзвёздные облака ( $T \approx 80 \text{ К}$ ,  $\rho = 1 - 1000 \text{ см}^{-3}$ ,  $d \sim 10 \text{ пк}$ ,  $M = 10 - 1000 M_{\odot}$ ) и межоблачную среду, или т. п. Тёплые области HI ( $T = 7000 - 10000 \text{ К}$ ,  $\rho \approx 0,1 \text{ см}^{-3}$ ). В областях HI водород и гелий слабо ионизованы. Остальная часть объёма занята газ. обл. областями т. в. коронального газа, или горячей фазой М. г. ( $T = 3 \cdot 10^6 - 10^8 \text{ К}$ ,  $\rho = 1 - 1003 - 0,01 \text{ см}^{-3}$ , иногда  $0,001 - 0,1 \text{ см}^{-3}$ ,  $d = 50 - 300 \text{ пк}$ ), в окрестностях к-рого имеются также зоны III низкой плотности ( $T \sim 10^6 \text{ К}$ ,  $\rho = 0,1 - 1 \text{ см}^{-3}$ ,  $d = 1 - 50 \text{ пк}$ ) и области III с  $T = 300 - 5000 \text{ К}$  (песк. % по объёму). Кроме этого, в М. г. имеются туманности, образуемые очень сильными (Маха число до  $10^4$ ) ударными волнами, созданными *звёздным ветром* и вспышками сверхновых и новых звёзд (см. *Остатки вспышек сверхновых*). М. г. в них нагреет до  $10^6 - 7 \text{ К}$  и более.

Большинство структур М. г. находится в состоянии, далёком от газодинамического, а иногда и теплового равновесия. Характерные времена динамич. процессов в М. г.  $t \approx d/v_{\text{др}} \approx 10^6 - 7$  лет ( $v_{\text{др}}$  — скорость звука). За такое время большинство структур М. г. разрушается. Особенно сложна и динамична структура М. г. в областях звездообразования. Их типичный размер  $100 - 500 \text{ пк}$ . В них собраны в единый комплекс гигантские молекулярные облака, протяжённые и компактные зоны III, ИК-туманности — протозвёзды, космич. мазеры на молекулах  $\text{H}_2\text{O}$ , OH,  $\text{CN}$ , OH и т. д.

Наряду с крупномасштабной структурой (туманности, облака) М. г. имеет сложную мелкомасштабную структуру — волокна, конденсации и т. д. с масштабами до  $0,1 - 0,001 \text{ пк}$  и менее. Возникают они под действием разл. гидродинамич. и магнитогидродинамич. неустойчивостей. Вытянутая форма часто обусловлена межзвёздными магн. полями.

**Физические процессы в М. г.** Условия в М. г. далеки от термодинамич. равновесия. Поэтому анализа условий в М. г. проводится на основе ур-ний статистич. баланса, учитывающих элементарные процессы, определяющие населённость уровней энергии атомов, ионов, молекул, их ионизацию и рекомбинацию, а также образование и разрушение молекул, нагрев и охлаждение среды. Обычно в М. г. с хорошей точностью устанавливается *Максвелла распределение* по скоростям — в ударных волнах отдельно для электронов и ионов, в др. случаях — общее для всех частиц, что позволяет говорить о темп-ре М. г. Отклонения населённостей уровней от *Больцмана распределения* обычно очень велики. Особенно ярко они проявляются в космич. мазерах. Населённость уровней, определяющая интенсивность спектральных линий и непрерывного спектра, формируется под влиянием столкновительных и радиативных процессов и нередко рекомбиниру. населением уровней.

Осп. механизмами ионизации М. г. являются фотоионизация, а также, по-видимому, ионизация низкоэнергичной частью *космических лучей* (субкосмич. лучами) и тепловыми электронами. В активных галактик. ядрах преобладает фотоионизация рентг. излучением. Важна роль *оже-эффекта* и реакций *перезарядки ионов* с атомами H и He, радиативной и *дизлектронной рекомбинации*.

*Кинетика химической М. г.* определяется как газофазными реакциями, так и реакциями на поверхности

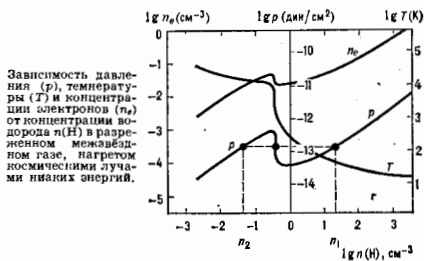
пылинок. Среди газофазных реакций важны лишь би-нарные процессы. Определяющую роль в поддержании разнообразия молекул играют ионно-молекулярные реакции, но имеющие актив. барьеры. Они важны, несмотря на очень низкую ( $\sim 10^{-4}$ ) степень ионизации М. г. в молекулярных облаках. В совр. М. г. (в отличие от условий в ранней Вселенной, см. *Космология*) молекулы  $\text{H}_2$  образуются на поверхности пылинок. Молекулы разрушаются УФ-излучением звёзд. Поэтому М. г. молекуляризован только в плотных облаках, центр. части к-рых экранированы от УФ-излучения межзвёздной пылью.

М. г. нагревается УФ-, мягкими рентг. и субкосмич. лучами, а также ударными волнами. Объёмное охлаждение происходит в осн. при излучении в спектральных линиях тепловой энергии, затраченной на возбуждение уровней, а также за счёт тормозного и рекомбинац. излучений в непрерывном спектре. В зависимости от темп-ры М. г. преобладает излучение в непрерывном спектре ( $T \gtrsim 10^4 \text{ К}$ ) либо в спектральных линиях — рентгеновских ( $T \sim 10^6 - 7 \text{ К}$ ), УФ- ( $T = 10^4 - 7 \text{ К}$ ), оптических ( $T = 5000 - 10000 \text{ К}$ ), ИК- ( $T = 30 - 5000 \text{ К}$ ), субмиллиметровых ( $T \lesssim 30 \text{ К}$ ).

Гамма-излучение М. г. обусловлено взаимодействием М. г. и пыли с космич. лучами. Наблюдаются гамма-линии позитрония (0,511 МэВ) и линии возбуждения атомных ядер (1–6 МэВ), а также излучение в непрерывном спектре с энергиями фотонов до  $10^{10}$  эВ. Непрерывный спектр формируется тормозным излучением электронного компонента космич. лучей и фотораспадом  $\pi^0$ -мезонов, образованных в ядерных реакциях.

В большей части объёма М. г. условно установившееся состояние, близкое к гидростатич. равновесию, — давление  $p$  в разных участках М. г. примерно одинаково.

В результате упомянутых выше процессов нагрева и охлаждения ур-ние состояния  $p(T)$  или  $p(n)$  непостоянно в области темп-р  $50 - 10^4 \text{ К}$  (рис.). Это означает,



что М. г. подвержен тепловой неустойчивости, разбивающей среду на облака HI ( $T \approx 80 \text{ К}$ ) и тёплые области III ( $T \approx 8000 \text{ К}$ ), отличающиеся по плотности в  $\sim 100$  раз.

Важнейшую роль в формировании крупномасштабной структуры М. г. играют взрывы *сверхновых звёзд*. Сильная ударная волна выметает осн. часть М. г. из области размером во мн. десятки пк, создавая долговжущие ( $\sim 10^7$  лет) полости, содержащие горячий (корональный,  $T \sim 10^6 \text{ К}$ ) газ очень низкой плотности  $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Холодному газу сообщаются пекулярные скорости  $\approx 6 - 15 \text{ км/с}$ . Часть М. г. поднимается взрывом на сотни парсек над галактик. плоскостью (т. в. галактик. фонтаны). При последующем охлаждении такой М. г. может падать назад в виде высокоопирированных облаков. При достаточной частоте *вспышек сверхновых* часть М. г. может оттекать от галактик в *межгалактический газ* (галактик. ветер). В поддержании попу-

лярных скоростей М. г. некую роль играют также звездный ветер и расширение зон НП. На формирование крупномасштабной структуры М. г. (особенно, видимо, в неправилных галактиках) существенное влияние оказывает неустойчивость Рэлея — Тейлора (см. *Неустойчивости плазмы*) газового диска галактики с высокоионизованной магн. полем. Она сбивает М. г. в «магнитных ямах» размером ок. 1 кпк.

Эволюция М. г. определяется гл. обр. обменом веществом со звездами в процессе звездообразования и при сбросе части массы звездами в М. г. на поздних этапах их эволюции (см. *Эволюция звезд*), а также в виде звездного ветра. За счёт термоядерной переработки вещества в звездах М. г. обогащаются тяжёлыми элементами, меняется его изотопный состав, причём с темпами, зависящими от скорости звездообразования. Это порождает, в частности, градиенты содержания элементов и изотопов вдоль радиусов спиральных галактик. Кол-во М. г. в галактиках в процессе круговорота вещества убывает с темпами, сильно различающимися в разных галактиках. Важную роль в поддержании кол-ва М. г. может играть взаимодействие с межгалактич. газом в *скоплениях галактик*: облака межгалактич. газа могут пополнять М. г., в свою очередь часть М. г. уходит в межгалактич. пространство. Давление межгалактич. газа может уносить М. г. и тем самым стимулировать звездообразование.

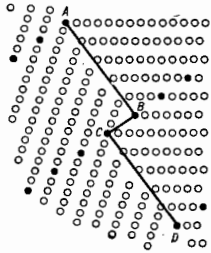
Лит. см. при ст. *Межзвёздная среда*. Н. Г. Бочкарёв. **МЕЖЗЕРНЫЕ ГРАНИЦЫ** — поверхность раздела между различно ориентированными областями (зёрнами) поликристалла. Многие физ. свойства зависят от числа и строения М. г. К ним относятся как свойства, связанные с переносом электронов, фононов, атомов и др. (электропроводность, теплопроводность, диффузия), к-рые рассеиваются на М. г., так и свойства, зависящие от взаимодействия между М. г. и дислокациями (механич. свойства), стенками магн. доменов (магн. жесткость), вихрями в *сверхпроводниках* (критич. ток и поле в жёстких сверхпроводниках) и т. п. Как и внеш. поверхность, М. г. являются двумерными *дефектами*, вносящими воумощение в энергетич. спектр кристалла (см. *Поверхность*).

Вблизи М. г. большинство физ. процессов протекает иначе, чем в объёме зёрен: как правило, облегчены выделение новых фаз, зарождение и развитие трещин; М. г. являются «стоками» примесных атомов. При высоких темп-рах на М. г. происходит рождение и исчезновение *вакансий* и *межузельных атомов*. Высокотемпературная пластич. деформация происходит существенно легче на М. г., чем внутри зёрен: зёрна как бы проскальзывают одно по поверхности другого, что в некоторых случаях облегчает развитие деформации в поликристаллах (сверхпластичность).

Свойства М. г. и приграничных областей определяются их атомо-кристаллич. строением, отличным от строения зёрен. Методы электронной и атомной микроскопии (см. *Ионный проектор*), *осе-спектроскопии* и др., а также теоретич. исследования (включающие моделирование на ЭВМ) позволили выяснить, что вблизи М. г. атомы смещаются из узлов кристаллич. решётки и образуют собств. периодич. (или почти периодич.) структуру, характерную для данной М. г. Смещение атомов могут приводить к возникновению внутр. напряжений в объёме зёрен, к-рые играют значит. роль при образовании *гетерофазных структур*. Однако, если размеры зёрен достаточно велики, возникновение внутр. напряжений энергетически невыгодно и М. г. имеют равновесную структуру, не приводящую к появлению дальнедействующих упругих полей. Именно такие М. г. обычно встречаются в поликристаллах.

Геометрически плоская граница двух зёрен определяется 8 параметрами: осью и углом взаимного поворота зёрен (3 параметра), вектором относит. смещения зёрна как целого (3 параметра) и единичным вектором

нормали к плоскости границы (2 параметра). Для каждой М. г. существует равновесное расположение атомов в приграничной зоне, определяющее все характеристики М. г., в частности её поверхностную энергию. Минимум поверхностной энергии обычно соответствует периодич. структуре с малыми периодами. При их описании пользуются т. н. копией совпадающих узлов: контакт зёрен рассматривается как область взаимного проникновения их решёток и плотность совпадающих узлов решёток принимается за характеристику М. г. Как правило, низкоэнергетич. М. г. характеризуется высокой плотностью совпадающих узлов. Границы, близкие по структуре к низкоэнергетич. М. г., описываются с помощью доплит. введения в структуру границы особых зернограничных дислокаций (рис.). Эксперимент подтверждает присутствие и движение в М. г. зернограничных дислокаций. С др. стороны, анализ построенных с помощью ЭВМ атомных моделей разл. М. г. позволил выявить в их структуре характерные атомные группы — многогранники Бернала, обычно используемые для описания строения *жидкости*. Оба подхода в рассмотре-



Двумерная модель поликристалла; AB, BC, CD — зернограничные дислокации.

нию структуры М. г. — дислокационный и как системы многогранников — хорошо согласуются.

Всё сказанное можно отнести к межфазным границам в гетерофазных структурах. Межфазные границы вследствие их большего разнообразия изучены менее систематично, чем М. г. Наиб. исследованы границы, разделяющие эпитаксиально растущую фазу и кристаллич. подложку. Структура таких границ представляет собой чередование участков бездефектного упругого сопряжения решёток и дислокаций несоответствия, компенсирующих разность параметров решёток эпитаксиальной фазы и фазы-подложки (см. *Эпитаксия*).

Важной характеристикой границ является их подвижность, определяющая кинетику рекристаллизации и фазовых превращений в гетерофазных структурах.

Лит.: Глейзер Г., Чалмерс Б., Болшевские Глебовые границы. пер. с англ., М., 1975; Структура межкристаллических и межфазных границ, М., 1980; Брэдло А. Н., Гетерофазные границы. пер. с англ., М., 1980; Брэдло А. Н., Полюшко А. Л., *Ростов*.

**МЕЖЗОННОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ** (знерновский пробой) — туннелирование электронов из валентной зоны диэлектрика или полупроводника в зону проводимости через запрещённую зону под действием электрич. поля (см. *Туннельный эффект*). М. т. можно рассматривать как рождение пары электрон — дырка в электр. поле (подобно рождению электрон-позитронной пары в вакууме в сильном поле). Вторые на возможность М. т. указал К. М. Зинер (С. М. Zener), к-рый высказал предположение, что М. т. ответственно за пробой *диэлектриков* в сильном электр. поле и *автотелектронную эмиссию* с поверхности диэлектриков. Экспериментально М. т. впервые наблюдал Л. Эсаки (L. Esaki) при прямых смещениях на полупроводниковых диодах, отличающихся сильным легированием p- и n-областей (см. *Туннельный диод*). Количество М. т. впервые развито в работах У. В. Хаустона (W. V. Houston) и Л. В. Келдыша. Вероятность М. т. (прозрачность потен. барьера Д) существенно зависит от структуры энергетич. зон. Для простых изот-

ропных зон, экстремумы  $k$ -рых лежат в одной и той же точке импульсного пространства и между  $k$ -рых разрешены дипольные оптич. переходы, прозрачность барьера в однородном электрич. поле  $E$  равна:

$$D = \exp\left[-\frac{\pi}{2} \frac{(\mu \mathcal{E}_g)^{3/2}}{e\hbar k} \left[\mathcal{E}_g + \frac{p_1}{\mu}\right]\right]. \quad (*)$$

Здесь  $\mu^{-1} = m_0^{-1} + m_{\text{д}}^{-1}$ ,  $m_0$  и  $m_{\text{д}}$  — эфф. массы электрона и дырки,  $\mathcal{E}_g$  — ширина запрещённой зоны,  $p_1$  — поперечная к  $E$  составляющая импульса электрона.

В случае вырожденных валентных зон (типичных для кубич. полупроводников)  $D(E)$  отличается от (\*) заменой  $m_{\text{д}}$  на эфф. массу т. в. лёгких дырок, т. к. экстрем. переходы с этой ветви дают осн. вклад в туннельный ток. В случае анизотропных зон, напр. в *многодоливых полупроводниках* типа РbTe, вероятность туннелирования зависит от ориентации  $E$  относительно кристаллограф. осей и для каждой пары экстремумов определяется ф-лой, отличающейся от (\*), заменой  $(E/\mu)^{3/2}$  на  $(\sum_{ij} E_i E_j \mu_{ij}^{-1})^{3/2}$  и  $p_1^2 \mu^{-1}$  на  $\sum_{ij} p_i p_j \mu_{ij}^{-1}$ , где

$\mu^{-1}$  — тензор обратной приведённой эфф. массы с компонентами  $\mu_{ij}^{-1} = m_{ij}^{-1} + m_{ij\text{д}}^{-1}$ . В *полупроводниках*, у  $k$ -рых экстремумы валентной зоны и зоны проводимости лежат в разных точках импульсного пространства (напр., в Ge, Si), туннельные переходы между этими экстремумами могут осуществляться только с передачей импульса фонону или примесному атому. Такое  $M. т.$  наз. фононо или примесно стимулированным. В полупроводниках, находящихся в электрич. поле, в результате  $M. т.$  становятся возможными поглощение света с энергией кванта  $\hbar\omega < \mathcal{E}_g$  (*Каддыша — Фрица эффект*) и обратный эффект — туннелирование электрона через  $p$ - $n$ -переход в валентную зону с испусканием фотона с  $\hbar\omega < \mathcal{E}_g$  (туннельная электрон-флуоресценция).

Продольное магн. поле  $H_{\parallel}$  не влияет на прозрачность  $D(E)$  и скамывается на  $M. т.$  лишь в меру изменения *плотности состояний* в результате квантования Ландау. Поле  $B \perp E$  уменьшает вероятность  $M. т.$ : в скрещенных полях  $D(E, B)$  определяется ф-лой, отличающейся от (\*) заменой  $E$  на  $(E^2 - \mathcal{E}_g^2 B^2 / 4\mu c^2)^{1/2}$ . При  $B > 2c(\mu \mathcal{E}_g)^{1/2} E$  траектории электронов в скрещенных полях становятся замкнутыми и  $M. т.$  возможно только при рассеянии электронов на фононах или примесных атомах. При анизотропном центре  $D(E, B)$  зависит от ориентации  $B$  в плоскости, перпендикулярной  $E$ .

**Лит.**: Z e n e r C., A theory of the electrical breakdown of solid dielectrics, Proc. Roy. Soc., 1934, v. 145, p. 323; И о в а т о в W. V., Acceleration of electrons in a crystal lattice, «Phys. Rev.», 1940, v. 57, p. 184; К е л а м Л. В., О поведении металлических кристаллов в сильных электрических полях, «ЖЭТФ», 1957, т. 33, в. 99, с. 6 в. О влиянии колеблющейся решетки кристалла на рождение электронно-дырочных пар в сильном электрическом поле, там же, 1958, т. 34, с. 962; А р о в о в А. Г., П и к у с Г. Е., Туннельный ток в поперечном магнитном поле, там же, 1966, т. 51, с. 281; Туннельные явления в твердых телах. Сб. ст., под ред. Ф. Бушневой, С. Луцивиста, пер. с англ., М., 1973. Г. Е. Пикус.

**МЕЖЗОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ** — переходы электронов из валентной зоны полупроводника в зону проводимости, сопровождающиеся образованием (генерацией) пары носителей заряда электрон проводимости — дырка; обратные  $M. п.$  наз. рекомбинацией носителей заряда. Генерационные  $M. п.$  могут быть обусловлены тепловым возбуждением, воздействием эл. магн. волн и т. д. Рекомбинационные  $M. п.$  могут быть спонтанными и вынужденными (см. *Полупроводники, Рекомбинация носителей заряда*).

**МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**. По природе, характерным энергиям и расстояниям близко к *межатомному взаимодействию*. Описывается теми же типами потенциалов взаимодействия, что и межатомное взаимодействие.  $M. в.$  наиб. существенно в плот-

ных газах и молекулярных конденсир. телах, т. е. в тех случаях, когда существует индивидуальное молекулы. Не имеет смысла говорить о  $M. в.$  в металлах, ионных кристаллах, их растворах и расплавах.

В результате  $M. в.$  происходит изменения в окружающей среде, под влиянием  $k$ -рых искажаются электронные оболочки и взаимное расположение атомов, входящих во взаимодействующие молекулы. По существу,  $M. в.$  сводится к совокупности взаимодействий каждого из атомов одной молекулы с каждым из атомов другой с учётом воздействия окружающей среды.  $M. в.$  обусловлено перекрыванием внеш. электронных оболочек атомов. Потенциалы  $M. в.$  часто выражаются аддитивными комбинациями атом-атомных, атом-ионных, ионно-ионных парных потенциалов. Однако принцип аддитивности справедлив лишь для эл.-статич. взаимодействий, ограниченно применим для дисперсионных и нелинейных к индукционным, резонансным и обменным  $M. в.$

Описание взаимного расположения молекул требует введения огромного числа координат, что преобразует одномерные (изотропные, сферически симметричные) зависимости потенц. энергии от координат (имеющее место, напр., для атом-атомного парного взаимодействия) в многомерные *потенциальные поверхности*  $M. в.$  В частности, для описания  $M. в.$  двухатомных молекул нужно ввести 6 параметров: расстояние между центрами молекул, два угла между осями молекул и линией, соединяющей их центры, угол между плоскостями, в  $k$ -рых лежат линия центров в каждой молекуле, а также два межядерных расстояния молекул. При  $M. в.$  двух молекул, состоящих из  $n_1$  и  $n_2$  атомов, их потенциал зависит от  $3(n_1 + n_2) - 6$  независимых переменных. При рассмотрении  $M. в.$  достаточно сложных молекул возникает задача нахождения на многомерной потенц. поверхности глобальных экстремумов среди большого числа локальных, связанных с перемещением и деформацией молекул.

Атомы в каждой из взаимодействующих молекул удерживаются хим. связями, а  $M. в.$  осуществляется более слабыми силами — ван-дер-ваальсовыми (рис. 1) или водородными связями. В *жидкостях и газах* за счёт водородных связей молекулы образуют кластеры и *полимеры*, в молекулярных кристаллах — *цепочки*,

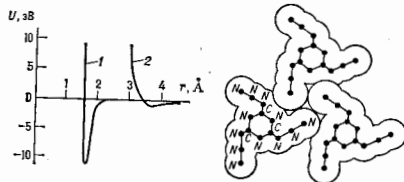


Рис. 1. Потенциалы химическо-го (1) и физического (2) донора тризидантеновой кислоты. На атомарный счет налета молекулярная «шуба».

сетки и сверхрешетки. За межмолекулярное расстояние принимают расстояние между ядрами ближайших атомов взаимодействующих молекул; они обычно больше характерных длин хим. связей. Молекулы как бы одеты в «шубу» (рис. 2), толщина  $k$ -рой равна радиусу  $r_M M. в.$  В табл. приведены в (А) атомные  $r_A$  и молекулярные  $r_M$  радиусы не-рых атомов (у благородных газов  $r_A$  и  $r_M$  совпадают).

**Анизотропия  $M. в. M.$**  в. зависит от направления, т. е. анизотропна. Наиб. яркое макроскопич. проявление анизотропии  $M. в.$  — образование кристаллич. и жидкокристаллич. структур. Анизотропия  $M. в.$  проявляется также в обмене энергией между разл. степенями свободы молекул, что приводит к стационарному (по ве

равновесному) сосуществованию значительно различающихся поступательной (и примерно равной ей вращательной), колебательной и электронной энергий газовой смеси. Это явление используется при создании лазеров, адекватной оценки параметров хим. и плазменных процессов, процессов переноса и т. в.

Ограниченная применимость моделей разл. сферически-симметричных (одномерных) потенциалов связана с тем, что центральное М. в. не может изменить угол момента и нек-рые компоненты колебл. движения молекул.

	H	He	C	N	O	F	Ne	Si	P
$r_H$ . . . . .	1,17	1,4	1,70	1,58	1,52	1,47	1,54	2,10	1,80
$r_A$ . . . . .	0,25	1,4	0,70	0,65	0,60	0,50	1,54	1,10	1,00

	S	Cl	Ar	As	Se	Br	Kr	Te	I	Xe
$r_H$ . . . . .	1,80	1,78	1,88	1,85	1,90	1,85	2,02	2,06	1,96	2,16
$r_A$ . . . . .	1,00	1,00	1,88	1,15	1,15	1,15	2,02	1,40	1,40	2,16

Анизотропия М. в. — следствие несимметричного распределения электр. зарядов молекулы, т. е. возникновения мультипольных моментов и анизотропии дисперсионного и обменного взаимодействий. Кроме того, даже при относительно-симметричном расположении зарядов анизотропия возникает в результате несоответствия центра зарядов с центром тяжести молекулы. На рис. 3 приведены зависимости потенциалов М. в. от радиуса

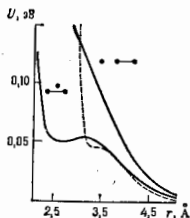


Рис. 3. Потенциалы взаимодействия He( $2^1S$ ) с молекулами водорода. Пунктирная кривая получена в экспериментах по рассеянию молекулярных пучков в сферически-симметричной аппроксимации. Теоретические кривые (сплошные) получены для различных взаимных расположений атомов He( $2^1S$ ) и молекул водорода (—•—).

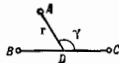
$r$  при разл. взаимном расположении молекул водорода и атомов гелия.

Анизотропные потенциалы можно представить в виде разложения по полиномам Лежандра. М. и. атома А с молекулой ВС (рис. 4) описывается потенциалом

$$U(r, \gamma) = \sum_n U_n(r) P_n(\cos \gamma),$$

где  $U_n(r)$  — радиальные компоненты,  $P_n$  — полиномы

Рис. 4. Взаимное расположение атома А и молекулы ВС, при котором возникает анизотропное межмолекулярное взаимодействие; В — центр молекулы ВС;  $\gamma$  — угол между осью молекулы и направлением АД.



Лежандра (угол  $\gamma$  отмечен на рис.). Ограничиваясь четными компонентами для первых двух членов, можно получить для  $U_0$  и  $U_2$  выражения в виде потенциалов Лежандра-Джонса:

$$U_0 = \epsilon \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 \right],$$

$$U_2 = \epsilon \left[ b_2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} - a_2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 \right];$$

$r_0, \epsilon, a_2, b_2$  — оптимальные для данной системы подго-  
товочные параметры; для системы, напр., Ar—N<sub>2</sub>  $r_0 =$   
 $= 3,93 \text{ \AA}$ ,  $\epsilon = 0,0103 \text{ эВ}$ ,  $a_2 = 0,26$ ,  $b_2 = 0,5$ .

М. в. в жидкостях. Независимо от свойств среды два эквивалентных объекта (пузырьки или коллоидные частицы) всегда притягиваются друг к другу. В том же случае, когда диэлектрич. восприимчивости  $\epsilon_A$  и  $\epsilon_B$  взаимодействующих молекул А и В и молекулы среды  $\epsilon$  отвечают равенству  $\epsilon > \epsilon_A > \epsilon_B$ , молекулы А и В отталкиваются.

Сила взаимодействия двух противоположных по знаку и равных по величине зарядов, между к-рыми расположена поляризуемая сфера, область (рис. 5, а), равна

$$F = - \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[ 1 + \frac{128\alpha}{4\pi\epsilon_0 r^3} \right],$$

где  $\alpha$  — поляризуемость среды,  $q$  — абс. величина каждого из зарядов,  $r$  — расстояние между ними,  $\epsilon_0$  — диэлектрич. проницаемость вакуума. Т. о., наличие поляризуемой среды между молекулами

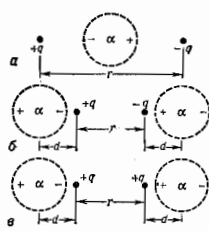


Рис. 5. Различное расположение зарядов  $+q$  и  $-q$  сферических поляризуемых областей  $r$  — расстояние между зарядами;  $d$  — расстояние между зарядами и центрами сферических областей.

увеличивает их потенц. энергию взаимодействия. Для зарядов, расположенных как показано на рис. 5(б), сила взаимодействия уменьшается:

$$F = - \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[ 1 - \frac{4\alpha}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left( 1 + \frac{2d}{r} \right) \left( 1 + \frac{d}{r} \right)^{-3} \right]$$

( $d$  — расстояние между зарядами и центрами сфер. областей). Для случая, когда заряды имеют одинаковый знак (рис. 5, в),

$$F = - \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[ 1 - \frac{4\alpha}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left( 1 + \frac{2d}{r} + \frac{2d^2}{r^2} \right) \left( 1 + \frac{d}{r} \right)^{-3} \right].$$

Дисперсионная энергия взаимодействия (см. Межмолекулярное взаимодействие) может быть вычислена с помощью теории возмущений. В более общем виде многочастичная задача М. в. решается при рассмотрении М. в. во флуктуирующем эл.-магн. поле в невзаимодействующей среде, характеризуемой комплексной диэлектрич. проницаемостью, зависящей от частоты поля.

Влияние магнитного поля на М. в. Теоретически предсказано и экспериментально обнаружено, что М. в. изменяется (возрастает) под действием не слишком интенсивных магн. полей, что приводит к увеличению (на десятки и сотни процентов) скоростей хим. превращений. В результате возникла новая область — спиновая химия. Обнаруженные явления основаны на законе Витнера — сохранении электронного спина и влиянии магн. поля на интеркомбинац. переходы между разл. спиновыми состояниями взаимодействующих молекул.

Аналитические методы расчёта М. в. Для расчёта потенциалов М. в. разработано большое число эмпирич., полуэмпирич. и чисто теоретич. (квантовомеханич.) методов. Обычно расчёты очень трудоемки и осуществляются на ЭВМ. Основой из них — метод согласованного поля (метод Хартри — Фока) и линейной комбинации молекулярных орбиталей (см. Квантовая химия). При выполнении аддитивности электронных плотностей взаимодействующих фрагментов применим метод модели электронного газа с использованием функционала Томаса — Ферми — Дирака.

Достаточно распространённой задачей является расчёт М. в. двух длинных насыщенных молекулярных цепей, к-рые часто состоят из чередующихся одно-  
тичных фрагментов с односторонним распределением

зарядов в каждом из них. В качестве фрагментов могут рассматриваться и отд. атомы либо пары химически связанных молекул. Используя второе приближение теории возмущений, можно рассчитать дисперсионное взаимодействие двух параллельных ценных молекул. Если две одинаковые молекулы состоят из  $N$  одинаковых фрагментов, каждый из  $x$ -рых взаимодействует с фрагментом др. молекулы, находящимся от него на расстоянии  $r$ , то энергия взаимодействия  $U(r)$  равна

$$U(r) = -\frac{C}{r^6}$$

что справедливо, если  $r \gg l$ , где  $l$  — размер фрагмента,  $C$  — константа. Суммарная энергия взаимодействия молекул длиной  $L$ , расположенных на расстоянии  $R$  друг от друга, равна

$$U(R) = -\frac{C\delta}{4l^2R^4} \left( 3 \arctg \delta + \frac{\delta}{1+\delta^2} \right)$$

( $\delta = L/R$ ). В двух предельных случаях больших и малых  $\delta$  соответственно имеем:

$$U(R) \approx -\frac{C3\pi N}{8l^2R^4} = -\frac{C3\pi\delta}{8l^2R^4}, \quad R \ll L,$$

и

$$U(R) = -\frac{CN^2}{R^4} = -\frac{C\delta^3}{l^2R^4}, \quad R \gg L.$$

Используя приближенную ф-лу для дисперсионной энергии взаимодействия связей, получим

$$U_{\text{св-св}} = -\frac{\bar{\alpha} \bar{\alpha}'}{\langle \sum_i n_i^2 \rangle + \langle \sum_i n_i'^2 \rangle} \cdot \frac{1}{r^6},$$

где  $\bar{\alpha}$  — ср. поляризуемость связи,  $\langle \sum_i n_i^2 \rangle$  — квантовомеханич. среднее квадрата суммы электронных координат связи с началом координат в центре тяжести электронного облака. Ниже приведены результаты расчетов (с точностью  $\sim 30\%$ ) дисперсионной константы  $C$  (в а. е. м.) взаимодействия связей в углеводородных веществах.

Связи	$C(S_p^2)-H$	$C(S_p^2)-C(S_p^2)$	$C(S_p^2)=C(S_p^2)$
$C(S_p^2)-H$	12,2	—	—
$C(S_p^2)-C(S_p^2)$	9,485	8,200	—
$C(S_p^2)=C(S_p^2)$	27,27	22,2	61,55

Вычисление суммарной энергии взаимодействия, напр. двух структурных единиц  $CH_2$ , приводит к выражению

$$U_{CH_2-CH_2} = -\frac{96,9}{r^6} [\text{а. е. м.}] = -\frac{1,34 \cdot 10^3}{r^6} \left[ \frac{\text{анал. молекул. Дг}}{\text{моль. Дг}} \right].$$

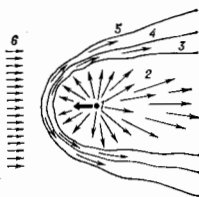
Аналогичные вычисления выполнены и для др. атоматомных потенциалов.

Лит.: Дашевский В. Г., Комфортация органических молекул, М., 1974; Бучаченко А. Л., Химическая поляризация электронов и ядер, М., 1974; Бучаченко А. Л., Сагдеев Р. Э., Салихов К. М., Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях, Новосибир., 1978; Молекулярные взаимодействия от двухатомных молекул до биополимеров, под ред. В. Польмана, пер. с англ., М., 1981; Мусли Я., Новакова О., Куиц К., Современная биохимия в схемах, пер. с англ., М., 1981; А н д р о н и к ш в и л и Ф. Д. ДНК великий абсолютный код, «Жизнь и жизнь», 1988, № 2-3; Киселев А. В., Пощинку Д. П. Я н и Ш. И. Молекулярные основы адсорбционной хроматографии, М., 1986. Ю. Н. Любитов.

**МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА** — плазма, нейтральный газ, пыль, ускоренные частицы и магн. поле, заполняющие околосолнечное пространство. Осн. компонентом М. с. является **солнечный ветер** — сверхзвуковой поток плазмы, возникающий в солнечной короне. Область, заполненная солнечным ветром, наз. г е л и о с ф е

р о й (рис.). Положение границ гелиосферы (гелиопаузы) определяется балансом динамич. давлений солнечного ветра  $\rho v_1^2(\rho_1 + v_1$  — его плотность и скорость) и межзвёздной среды  $\rho v_2^2 + nkT + B^2/8\pi$ , где  $\rho_2$ ,  $n$  и  $T$  — плотность, концентрация и темп-ра межзвёзд-

Схема гелиосферы: 1 — Солнце; 2 — область солнечного ветра; 3 — граница гелиосферы (ударная волна); 4 — ударная волна в межзвёздной плазме; 5 — делящая поток плазмы солнечного происхождения и поток межзвёздной плазмы (интерпланетный разрыв); 6 — ударная волна в межзвёздной плазме; 6' — поток межзвёздной плазмы (в системе координат, связанной с Солнцем). Стрелки показывают направление течения плазмы, широкая стрелка указывает направление движения Солнца относительно межзвёздной среды.



ного вещества,  $B$  — величина межзвёздной магн. поля в окрестности Солнца,  $v_2$  — скорость Солнца относительно межзвёздной среды (вклад теплового и магн. давления в полное давление солнечного ветра пренебрежимо мал). Согласно оценкам, расстояние до границы гелиосферы в направлении вектора  $v_2$  составляет 50–100 а. е. Скорость Солнца относительно межзвёздной среды составляет 22–25 км/с. Т. к. поток солнечного ветра и поток межзвёздного вещества относительно Солнца являются сверхзвуковыми, в области их взаимодействия должны образоваться две ударные волны и оболочка разогретой растекющейся плазмы. Протяженность гелиосферы и форму её границы с противоположной стороны трудно оценить, т. к. характер процессов в области взаимодействия недостаточно ясен. Некоторые исследователи считают, что в направлении антиапенкса (см. Алекс) гелиосфера может простираться до  $\sim 4000$  а. е.

Осн. источник нейтрального газа в М. с. — межзвёздный газ, свободно проникающий через гелиопаузу. Плотность нейтрального водорода оценивается в  $\approx 0,06 \text{ см}^{-3}$ , гелия  $\approx 0,008 \text{ см}^{-3}$ . Эти данные получены в результате анализа измерений интенсивности резонансного рассеяния излучения Солнца в линиях 1216 Å и 564 Å на атомах водорода и гелия соответственно. Траектории нейтральных атомов водорода вблизи Солнца определяются балансом сил гравитат. притяжения и радиат. отталкивания. В период минимума **солнечной активности** преобладает притяжение атомов водорода, в период максимума — отталкивание. В результате атомы водорода (в период минимума активности) и атомы гелия (в к-рых притяжение Солнца преобладает всегда, фокусируются на линии антиапенкса), образуя нейтральный хвост. Так, для гелия возрастание концентрации в результате фокусировки достигает  $\approx 5$  раз на расстоянии 10 а. е. в направлении антиапенкса. Большинство атомов водорода не долетает к ближайшим к Солнцу объектам из-за сильной ионизации солнечным излучением: уже до орбиты Земли доходит < 10% нейтральных атомов водорода. Размер области ионизации гелия значительно меньше 1 а. е. Ещё один источник нейтральных атомов в М. с. — планеты, их спутники, кометы и межпланетная пыль. Быстрые нейтральные атомы образуются при пересечении ионов солнечного ветра на нейтральных атомах.

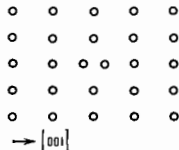
Пылевой компонент межзвёздной среды (видимый с Земли как **зодиакальный свет**) концентрируется в плоскости эклиптики (см. **Координаты астрономические**). Помимо анализа данных о зодиакальном свете, источниками наших знаний о межпланетной пыли являются изучение микрократеров на частях лунного грунта, доставленного на Землю, регистрация ударов пылинков на космич. аппаратах и сбор пыли на больших

(~ 100 км) высот с помощью ракет. Распределение дунных микрометеоритов по размерам даёт сведения о спектре масс и плотности межпланетной пыли и показывает существование как рыхлых (плотность  $\rho < 1 \text{ г/см}^3$ ), так и обычных ( $\rho \approx 1-8 \text{ г/см}^3$ ) пылинки, массы к-рых находятся в диапазоне  $10^{17}-10^{-3} \text{ г}$ . Полная масса пыли в Солнечной системе (согласно оценкам) составляет  $10^{10}-10^{20} \text{ г}$ . Собранные с помощью ракет образцы пыли выявили существование рыхлых частиц — агломератов из очень маленьких ( $< 0,1 \text{ мкм}$ ) пылинок (частицы Брауни). Большинство исследователей считает, что осн. источник межпланетной пыли — кометы. Недавние измерения пыли кометы Галлея на космич. аппаратах «Вега» и «Джонто» показали наличие широкого спектра масс пылинок (от  $10^{-17}$  до  $10^{-6} \text{ г}$ ) и, по-видимому, существование рыхлых ( $\rho < 1 \text{ г/см}^3$ ) частиц. По измерениям на спутнике IRAS обнаружены пылевые следы комет, простирающиеся вдоль их орбит на десятки млн. км в обе стороны от ядра.

Ещё один компонент М. с. — энергичные заряды. Частицы галактич. и солнечного происхождения. Галактич. космические лучи с энергией больше  $10 \text{ МэВ/нуклон}$  диффундируют из межзвёздной среды в область расширяющегося замедленного солнечного ветра. Скорость их диффузии определяется их жёсткостью, структурой межпланетного магн. поля и скоростью солнечного ветра. С изменением солнечной активности меняются скорость диффузии и интенсивность космич. лучей с энергией  $< 3 \cdot 10^3 \text{ МэВ/нуклон}$  в Солнечной системе. Частицы большей энергии не подвержены влиянию солнечной активности. Солнечные энергичные заряды, частицы (солнечные космич. лучи) с энергиями обычно  $\leq 400 \text{ МэВ}$  генерируются во время солнечных вспышек и в магн. ловушках активных областей. После вспышек они распространяются как вдоль силовых линий межпланетного поля, так и поперёк в результате диффузии на его неоднородностях. Из активных областей происходит утечка энергичных частиц с образованием рекуррентных потоков вдоль силовых линий межпланетного магн. поля. Энергичные частицы генерируются также на фронтах межпланетных ударных волн, как распространяющихся от Солнца по солнечному ветру, так и стоящих в солнечном ветре перед препятствиями — планетами.

Лит.: А. Касофу С. И. Чси же в С., Солнечно-земная физика, пер. с англ., М., 1975.

**МЕЖУЗЕЛЬНЫЙ АТОМ** (точечный дефект внедрения) — внедрённый в кристаллич. решётку избыточный (собственный или примесный) атом. Окружающие М. а. атомы (или ионы) смещаются из своих положений равновесия и улаживают решётки и могут изменить зарядовое состояние. Эти смещения и перераспределение электронов определяются из условия минимума свободной энергии кристалла с М. а. Если смещения малы по сравнению с межатомным расстоянием, внедрённый атом занимает одно из междоузлий в решётке и является межузельным в буквальном смысле (напр., С в Fe). В др. случаях



Межузельный атом в гангелевой конфигурации [плотность (110) градиенту кристаллич. кубической решётки].

внедрённый атом, вытесняя атом из угла, образует с ним т. н. гангелев с центром тяжести в узле решётки (рассеяние в л и з в о м е ж д о у з л е). В гангелеевской кубич. решётке [ГЦК] ось гангели ориентирована обычно вдоль [100] (рис.), в объёмноцентриров. ку-

бич. решётке (ОЦК) — вдоль [110]. Третья конфигурация М. а. — *краудинг*. Собственные и примесные М. а. взаимодействуют друг с другом и с др. дефектами, образуя т. н. смешанные гангели и связанные пары Френкеля (вакансии и М. а.), скопления М. а. в виде дислокационных петель и в е д р е н и я и др. Энергии образования разл. конфигураций М. а. мало различаются и составляют обычно неск. эВ. Энергии миграции значительно меньше, чем у вакансий, — сотые и десятые доли эВ. Поэтому М. а. подвижны даже при темп-ре  $T < 80 \text{ К}$ .

Лит.: Томпсон М., Дефекты и радиационные повреждения в металлах, пер. с англ., М., 1971; Современная кристаллография, т. 2, М., 1979, гл. 5; Смирнов А. А., Теория сплавов, издательство М., 1979.

**МЕЖЭЛЕКТРОННОЕ РАССЕЯНИЕ** (ре-ассеяние) — процесс, при к-ром два электрона проводимости в металле и полупроводнике переходят из состояний с импульсами (в единицах  $\hbar$ )  $k_1$  и  $k_2$  в состояние с импульсами  $k'$  и  $k'_2$  в результате кулоновского взаимодействия. При М. р. происходит передача энергии  $\mathcal{E}$  и импульса  $k$  от одного электрона к другому, но полная энергия и импульс сохраняются:  $\mathcal{E}_{k_1} + \mathcal{E}_{k_2} = \mathcal{E}_{k'} + \mathcal{E}_{k'_2}$  и  $k_1 + k_2 = k' + k'_2$ . Исключение составляет так называемое М. р. с перебросом, когда  $k_1 + k_2 = k' + k'_2 + b$ , где  $b$  — вектор обратной решётки (см. *Переброс процесса*). В отличие от них процессы с  $b = 0$  наз. нормальными. В полупроводниках и полуметаллах, где  $k \ll b$ , М. р. с перебросом обычно запрещено, однако в металлах, где  $k \sim b$ , перебросы существуют.

Нормальные процессы М. р. устанавливают равновесие внутри электронного газа. Это означает, что любое неравновесное распределение электронов по импульсам  $f(k)$ , созданное выпш. воздействием, под влиянием М. р. трансформируется в т. н. стационарное фермиевское распределение:

$$f_F(k) = \left\{ \exp \left[ \frac{\mathcal{E}_k - \hbar k v - \mu_0}{T_e} \right] + 1 \right\}^{-1}. \quad (1)$$

Здесь  $T_e$  и  $\mu_0$  — электронная темп-ра и электронный химический потенциал,  $v$  — скорость, с к-рой распределение как целое движется относительно кристалла (в системе координат, движущейся со скоростью  $v$ ,  $f_F$  — обычное распределение Ферми с  $T = T_e$ ). Если процессы переброса несущественны, то параметры  $T_e$ ,  $\mu_0$ ,  $v$  определяются из законов сохранения числа частиц, энергии и импульса.

Распределение (1) устанавливается за время  $\tau_{ee}(\mathcal{E})$ , в к-рое энергия и импульс перераспределяются между всеми электронами (время релаксации). Для невырожденного электронного газа  $\tau_{ee}$  определяется соотношением

$$\frac{1}{\tau_{ee}} = \alpha_F \frac{\mathcal{E}_0 n}{(\hbar k)^2}; \quad \hbar k = (2m^* \mathcal{E})^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь  $\mathcal{E}_0 = m^* e^2 / 2\hbar^2 \epsilon^2$  — боровская энергия,  $m^*$  — эффективная масса электрона,  $\epsilon$  — диэлектрич. проницаемость,  $n$  — плотность электронов. Для вырожденного электронного газа

$$\frac{1}{\tau_{ee}} = \alpha_F \frac{\mathcal{E}_0}{\hbar} \left( \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_F}{\mathcal{E}_F} \right)^2,$$

где  $\mathcal{E}_F$  — ферми-энергия. Численные множители  $\alpha_F$ ,  $\alpha_F$  зависят от того, какое время релаксации (импульса или энергии), вычисляется.

Оценивая время  $\tau_{ee}$  при  $\mathcal{E} = kT_e$  или  $\mathcal{E} - \mathcal{E}_F = kT_e$ , можно найти время установления распределения  $f_F$ . Такое распределение устанавливается, только если  $\tau_{ee} \ll \tau$  или  $\tau$ , где  $\tau$  и  $\tau$  — времена релаксации электронов по импульсу и по энергии при рассеянии (на дефектах решётки и фононах).

Роль М. р. в кинетич. явлениях иная, чем у рассеяния на дефектах и фононах. Так как М. р. не изменяет полные импульс и энергию, а только перераспределяет



их между электронами, то оно по может быть причинной релаксации импульса и избыточной энергии, к-рые электронный газ получает извне. Поэтому, в частности, М. р. не может обеспечить конечного электросопротивления п. Однако оно может изменить сопротивление, обусловленное рассеянием на решётке, напр. «перенос» импульса в области импульсного пространства, где он слабо релаксирует на дефектах решётки и фононах, в область, где релаксация сильнее. Именно так обстоит дело в случае рассеяния на оптич. фононах с энергией  $\hbar\omega_0$  при низких темп-рах  $kT \ll \hbar\omega_0$ , когда рассеяние на решётке является слабым в области  $\delta k < \hbar\omega_0$  и сильным при  $\delta k > \hbar\omega_0$ .

Если узким местом процесса релаксации является именно перенос импульса по к-пространству за счёт М. р., то

$$\rho^{-1} \sim \frac{ne^2}{m} \tau_{ee}.$$

Из этой ф-лы рассеяние на решётке выпадает, во она справедлива, только если  $\tau_{ee} \gg \tau$ , и теряет смысл, если рассеяние на решётке полностью «выключить».

М. р. с перебором не сохраняет полный импульс и тем напоминает рассеяние на решётке. Поэтому оно может быть причиной электросопротивления металла. Оценивая  $\tau_{ee}$  при  $\delta - \delta_f \approx T$ , получаем  $\rho \sim T^2$ . К М. р. относят и столкновения носителей заряда разных типов, напр. электронов проводимости и дырок. Такие процессы приводят к выравниванию их темп-р и хим. потенциалов. М. р. проявляется также в процессах ударной ионизации и рекомбинации (см. *Оже-эффект*).

Лит.: Гантмахер В. Ф., Левинсон И. Б., Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках, М., 1984, И. Б. Левинсон.

**МЕЗОАТОМЫ** — атомы, в к-рых один из электронов оболочкой замещён отрицательно заряж. частицей — мюоном ( $\mu^-$ ) или адроном ( $\pi^-$ , К-мезонами, антипротоном и др.). Существование М. было предсказано Дж. А. Уилером (J. A. Wheeler) в 1949 и вскоре подтверждено экспериментально. Радиусы М. в невозбуждённом состоянии  $r = 4,3 \cdot 10^{-9} mZ$  см, где  $Z$  — заряд ядра,  $m$  — приближённо равно отношению массы частицы к массе электрона. Более точно:

$$r = \frac{m_e}{m_\mu} (1 + m_\mu/M),$$

где  $m_e$ ,  $m_\mu$  — массы электрона и мюона (или адрона),  $M$  — масса ядра. Наиб. изучены М., состоящие из ядра водорода и  $\mu^-$  ( $r = 2,8 \cdot 10^{-11}$  см, см. *Мюонный атом*),  $\pi^-$  ( $r = 2,2 \cdot 10^{-11}$  см) или  $K^-$  ( $r = 0,8 \cdot 10^{-11}$  см) (см. *Адронные атомы*).

Л. И. Пономарёв.  
**МЕЗОАННАЯ ФАБРИКА** — ускоритель, предназначенный для получения пучков  $\pi$ -мезонов и мюонов ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ) высокой интенсивности в широком диапазоне энергий. Поскольку сечения рождения частиц малы ( $\sim 1$  мб), то для получения необходимых плотностей потоков  $\pi$  и  $\mu$  и требуются протонные пучки со ср. значениями токов от десятков мкА до 4 мА.

В настоящее время (1990-е гг.) в М. ф. используются протонные ускорители трёх типов: резонансные линейные ускорители, изохронные циклотроны, фазотроны с большой частотой повторения циклов. На М. ф. наряду с фундам. исследованиями проводится также большой спектр прикладных исследований в области физики твёрдого тела, химии, медицины, биологии и др., имеющих важное народнохозяйств. значение. Характеристики наиб. крупных М. ф. приведены в табл. 1.

В самой сильнейшей из действующих Лос-Аламосской М. ф. генерируются потоки пионов низких (0—300 МэВ) энергий с интенсивностями  $3 \cdot 10^9 \pi^+$ /с или  $8 \cdot 10^8 \pi^-$ /с и потоки пионов высоких (100—600 МэВ) энергий —  $10^{10} \pi^+$ /с или  $10^9 \pi^-$ /с. В изохронном циклотроне TRIUMF ускорены ионы  $H^+$ , к-рые перезаряжаются на выходной мишени в протоны.

Табл. 1. — Крупнейшие мезонные фабрики

Тип ускорителя	Месторасположение	Энергия, МэВ	Средний ток, МА	Вид частиц
Линейный ускоритель LAME	Лос-Аламос, США	800	до 1	$p, H^+$
Линейный ускоритель МФФ АН СССР	Москва, СССР	600	до 1	$p, H^+$
Изохронный циклотрон SIN	Цюрих, Швейцария	600	0,14	$p$
Изохронный циклотрон TRIUMF	Ванкувер, Канада	500	0,07	$p, H^+$

В сер. 1980-х гг. в ряде центров по ядерной физике начались работы по проектированию т. н. каонных фабрик (К. ф.), представляющих собой ускорит. комплексы для получения высокоинтенсивных протонных пучков (ср. ток 100—150 мкА) с энергией порядка 30—60 Гэв, к-рые при взаимодействии с мишенями могут рождать потоки вторичных частиц: каонов, антипротонов, гиперонов, нейтрино и др. Благодаря высокой интенсивности вторичных пучков возникают широкие возможности исследования редких распадов, получения экзотич. ядер и т. п. В нек-рых случаях К. ф. называют адронными фабриками (Hadron Facility).

Получение в К. ф. интенсивности, превышающих более чем на порядок ср. интенсивность пучков действующих синхротронных протонных, предполагается достигнуть за счёт высокой частоты повторения ускорения циклов и применения сильноточных инжекторных комплексов повыш. энергии. Поэтому К. ф. строится по каскадной схеме: инжектор (выходная энергия 500—800 МэВ), быстросцилирующий протонный синхротрон — бустер (выходная энергия 2—7,5 ГэВ), осн. протонный синхротрон. В нек-рых проектах К. ф. для удобства физ. экспериментов предусматриваются также и акцидентальные коллайды (см. *Накопители*), напр. накопит. кольцо (Stretcher) для медленного вывода пучка на мишень.

Действующих К. ф. ещё нет, и разрабатываемые проекты, как правило, привязываются к существующим М. ф. При этом ускорители М. ф. используются как инжекторы в бустер: часть пучковых импульсов поступает в бустер, остальная часть — на физ. эксперимент. Характеристики проектов К. ф., создаваемых на базе М. ф., приведены в табл. 2.

Табл. 2. — Каонные фабрики

Установка	Месторасположение	Тип инжектора	Характеристики основного протонного синхротрона				
			энергия, ГэВ	ср. ток, мкА	частота повторения, Гц	число протонов в импульсе, $10^{10}$	длина пучка, А
TRIUMF KF	Канада	Изохронный циклотрон	30	100	10	6	2,8
LAMPE-II	США	TRIUMF Линейный ускоритель	60	25	12	1,3	0,5
МФФ АН СССР	СССР	Линейный ускоритель МФФ	45	125	8,25	12	4,0

Разрабатываются и др. варианты построения К. ф. Напр., в Японии обсуждается проект адронной фабрики (Japanese Hadron Facility), к-рая должна работать совместно с действующим ускорит. комплексом KEK (протоны, 42 ГэВ) — TRISTAN (встречные пучки  $e^+e^-$ , 25 ГэВ). вновь разрабатываемый комплекс адронной фабрики включает линейный ускоритель протонов

с энергией 1 ГэВ при ср. интенсивности пучка 200 мкА, линейный ускоритель тяжелых ионов с энергией 8 МэВ/дулка и быстроциклирующий синхротрон — бустер с накопит. кольцом типа Stretcher с энергией до 3 ГэВ. В бустере предполагается ускорять как протоны, так и тяжелые ионы. Пучок протонов (3 ГэВ, 200 мкА) будет доускоряться и протонном синхротроне КЕК до энергии 30 ГэВ. На этой адронной фабрике илазируются эксперименты по четырем программам: к а о н и я — эксперименты по редким распадам каонов и гиперядерные эксперименты на каонных пучках; н е й т р о н я — физика конденсиров. сред с помощью каскадных нейтронов; м е а о н и я — ядерная физика с мюонами энергии в неск. ГэВ и изучение свойств конденсиров. сред с помощью мюонов ( $\mu SR$ -метод); а к т и в н ы е я д р а — изучение свойств экзотич. ядер и ускорение этих ядер.

Лит.: Д и т р и е в с к и й В. П., Мезонные фабрики, в кн.: Труды I Международной школы молодых ученых по проблеме ускорителей заряженных частиц. Углерод, 4—15 сентября 1975, Дубна, 1976; М у р и н В. П., Линейные ускорители для мезонных фабрик, там же; Proceedings of the International Workshop on Hadron Facility Technology, Santa Fe, Feb. 2—5, 1987 (LA—11130—C). В. П. Мурин.

**МЕЗОННАЯ ХИМИЯ** — метод изучения структуры вещества, к-рый использует свойства мюонов ( $\mu^+$ ),  $\pi^-$  и  $K^-$ -мезонов для получения данных об электронной оболочке молекул, кристаллич. и магн. структуре веществ, скоростях хим. реакций и т. д. Возник в 1960-х гг. В М. х. можно выделить четыре осн. направления исследований:  $\pi^-$  и  $\mu^-$ -мезонная химия, изучение поведения  $\mu^+$  в веществе и реакций мюония (связанной системы  $\mu^+e^-$ ).

В основе  $\pi^-$ -мезонной химии лежит использование ядерной реакции перезарядки  $\pi^-$  на ядрах водорода:  $\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0$ . Вероятность  $W$  этой реакции осн. сильно зависит от заряда  $Z$  (в единицах заряда протона) ядра атома  $Z$ , с к-рым связан водород в соединении  $Z_mH_n$ , и равна  $W(Z_mH_n) \approx a(n/m)Z^{-2}$ . Кроме того, коэф.  $a$  в этой ф-ле даже при одном и том же  $Z$  зависит от типа хим. связи между атомами  $H$ , в частности от степени ионности (полярности) связи. Т. о.,  $\pi^-$ -мезонный метод позволяет надбжно отличить химически связанный водород от свободного. Напр., для аммиака  $NH_3$  и эквивалентной ему механик. смеси  $N_2 + 3H_2$  измеренное отношение

$$W(NH_3)/W(N_2 + 3H_2) \approx 1/10.$$

Коэф.  $a$  зависит также от физ. состояния облучаемого  $\pi^-$ -мезонами вещества. Напр., при нагревании воды от комнатной темп-ры до темп-ры  $\approx 400^\circ C$  коэф.  $a$  увеличивается примерно вдвое.

В основе  $\mu^-$ -мезонной химии лежит измерение энергии и интенсивностей отд. линий рентг. серий мюонийз атомов разл. хим. элементов. При захвате  $\mu^-$  на возбужденных уровнях и последующих переходах в осн. состоянии  $\mu^-$ -атома испускаются характерные для каждого элемента  $\gamma$ -кванты. Энергия излучаемых мезорентгеновских серий является характерной хим. элемента, ядро к-рого вместе с мюоном образует мезоатом. Такой спектральный анализ элементного состава вещества по существу ничем не отличается от обычного спектрального анализа. Однако, в отличие от рентг. серий обычных атомов, отнесен. интенсивность отд. линий рентг. серий мезоатома зависит от вида хим. соединения, в к-рое входит исследуемый элемент. Это свойство рентг. излучения  $\mu^-$ -атомов положено в основу идеи нового метода анализа вещества в закрытых контейнерах, к-рый в принципе позволяет определить не только элементный состав образца, но также и вид хим. соединения, составленного из этих элементов. Используя мюоны малых энергий, можно изучать также свойства и хим. состав поверхностей.

При изучении свойств вещества с помощью  $\mu^+$  и мюония ( $Mu$ ) используются наличие спина у мюона и электрона, а также факт несохранения чётности при

распаде  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ . Направление вылета  $e^+$  в этой реакции коррелировано с направлением спина  $\mu^+$ . Поэтому в магн. поле вследствие прецессии спина мюона с частотой  $\omega_p = eH/m_\mu c$  (где  $H$  — напряжённость магн. поля,  $m_\mu, e$  — масса и заряд мюона) периодически меняется также интенсивность позитронов, вылетающих в нек-ром фиксиров. направлении (рис.); это даёт возможность следить за направлением

Схема наблюдения спина мюона ( $\mu^+$ ). Магнитное поле перпендикулярно направлению вылета позитрона; толстая стрелка — направление спина  $\mu^+$ .



спина  $\mu^+$ . Т. о.,  $\mu^+$ , а также мюоний представляют собой, по существу, меченые атомы (см. *Изотопные индикаторы*), за движением к-рых можно проследить от момента их рождения до момента распада. В частности, локальные магн. поля в кристалле взаимодействуют со спином  $\mu^+$  и изменяют картину прецессии его спина, что позволяет делать заключения о величине и распределении внутр. магн. полей в кристалле, изучать диффузию мюонов в кристаллах, обнаруживать фазовые переходы с изменением магн. структуры и т. д. Метод изучения свойств вещества с помощью  $\mu^+$  наз.  $\mu SR$ -методом (muon spin rotation), получившим широкое распространение (см. *Мюоний спиновой релаксации метод*).

Мюоний является аналогом атома водорода, поэтому, исследуя реакции мюония, можно сделать заключения о реакциях атомарного водорода. Т. к. спин мюония (в ортосостоянии) равен 1, а приведенная масса приближ. равна массе электрона, частота его прецессии составляет  $\omega_p \approx eH/2m_\mu c$ . При вступлении мюония в хим. реакцию связь между  $\mu^+$  и  $e^-$  разрывается и характер прецессии резко меняется, что позволяет определить абс. скорости хим. реакций мюония, а следовательно, и реакций атомарного водорода. С помощью мюония удалось моделировать состояние водородного атома в полупроводниках, растворах и т. д.

Развитие получает также мюонная химия сложных атомов. Напр., при захвате  $\mu^-$  на орбиту мезоатомов неона и аргона образуются мезоатомы соответственно с электронными оболочками атомов фтора и хлора. Взаимодействие спинов мюона и нераспаренного электрона атомных оболочек этих галогенов приводит к тому, что в магн. поле их суммарный магн. момент прецессирует с частотой мюония. Наблюдение этой прецессии позволяет измерять абс. скорости реакций атомов фтора, хлора и т. д.

Лит.: Герштейн С. С. и др., Мезоатомные процессы и модель больших мезомолекул, «УФН», 1969, т. 97, с. 3; Гольдманский В. И., Фирсов В. Г., Химия новых атомов, «Успехи химии», 1971, т. 40, в. 8, с. 1333; Мюон физикс, в. 3, ed. by V. W. Hughes and C. S. Wu, N. Y., 1975; Экзотич. атомы, 79, N. Y., 1980; К и р и л о в а - У г р о м о в В. Г., Н и к и т и н Ю. П., С е р г е е в Ф. М., Атомы и мезоны, М., 1980.

Л. Н. Пономарёв.

**МЕЗОНЫ** — адроны, не обладающие *барьонным числом* и имеющие целочисленный спин. Как у всех адронов, *лептонные числа*  $M$  равны нулю. Назв. « $M$ » происходит от греч. слова *mésos* — средний, промежуточный; исторически это связано с тем, что масса первых из обнаруженных  $M$  — *пи-мезонов* — оказалась промежуточной по величине между массами электрона и протона. В дальнейшем выяснилось, что такое значение массы не является отличиям. признаком  $M$ . (масса  $M$  может быть во много раз больше массы протона  $m_p$ ).

По совр. представлениям,  $M$  — сложные системы, построенные (в осн.) из пары частиц со спином  $1/2$  — *кварка* и *антикварка* ( $qq$ ), вообще говоря, различных по своей природе, и небольшой примеси *глюонов*. В редких случаях  $M$  могут быть построены из неск. кварк-антикварковых пар (двух и более). Согласно предкааниям *квантовой хромодинамики*, могут существовать также  $M$ , построенные из глюонов. Такие  $M$  наз. *глюо-*

болели или глюони стимии. Благодаря квантовым переходам глободы должны содержать примесь кварк-антикварковых состояний.

Типы кварка и антикварка, входящих в пару, образующую  $M$ , взаимная ориентация спинов пара, а также характеристики их относительного движения целиком определяют все квантовые числа и характерные массы  $M$ . Так, спин  $M$  равен  $L + S$ , где  $L, S$  — орбитальный момент и суммарный спин пары ( $q\bar{q}$ ); чётность  $P = (-1)^{L+1}$ ; зарядовая чётность (для истинно нейтральных  $M$ )  $C = (-1)^{L+S}$ . В настоящее время известны шесть типов кварков:  $u, d, s, c, b, t$  (и соответствующих антикварков), причём  $m_u \approx m_d \ll m_s \ll m_c \ll m_b \ll m_t$ .  $M$ , построенные из  $u$  и  $\bar{d}$  (или из  $\bar{u}$  и  $d$ ), образуют семейство обычных  $M$ ; к ним относятся, в частности,  $\pi, \rho, \omega$ . Их массы, как правило, меньше массы протона. Если в обычных  $M$   $u$  или  $\bar{d}$  заменить на  $s$  ( $\bar{s}$ ),  $c$  ( $\bar{c}$ ),  $b$  ( $\bar{b}$ ) или  $t$  ( $\bar{t}$ ), то возникают семейства соответственно странных, очарованных, красных (предельных), истинных  $M$ . Причём по мере увеличения массы кварков, определяющих тип семейства  $M$ , нарастают ср. массы соответствующих мезонных семейств. Так, массы странных  $M$  в ср. больше масс обычных  $M$ , массы очарованных  $M$  в ср. больше масс странных  $M$  и т. д. Массы очарованных  $M$  составляют уже ок.  $2m_p$ , предельных — ок.  $5m_p$ , истинных  $M$  — ок.  $50 m_p$ . Комбинации  $s\bar{s}, c\bar{c}, b\bar{b}, t\bar{t}$  образуют  $M$  соответственно со скрытой странностью, очарованием, красотой, истинностью, в ряде отношений отличающиеся от обычных  $M$ . (см. *Кварковая*). Возможны также гибридные комбинации кварков-антикварков  $s\bar{c}, \bar{s}c$  и т. п., порождающие странно-очарованные, странно-предельные, очарованно-предельные и др.  $M$ .

Все  $M$  — нестабильные частицы, распадающиеся либо на совокуность более лёгких  $M$ , либо на более лёгкий  $M$  и лептонную пару, либо (обычные  $M$ ) — на лептонную пару или (нейтральные) на два  $\gamma$ -кванта.

Табл.  $M$  и их кварковый состав см. в ст. *Элементарные частицы*.

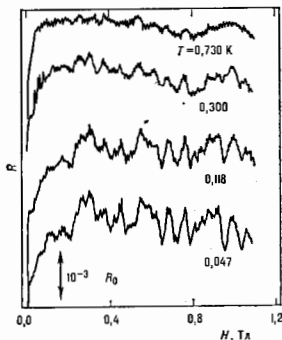
А. А. Поляр.

**МЕЗОСКОПИКА** — совокуность явлений, наблюдающихся в телах конечных размеров, содержащих микроскопич. неоднородности, связанных с неусреднёнными свойствами тел по разл. реализациям случайных неоднородностей. Проявляется в том, что у тел, обладающих одинаковыми геом. размерами, концентрацией примесей, темп.-рой и др. макроскопич. параметрами, ряд свойств различен. Напр., отличие сопротивлений  $R$  конкретного образца от значения  $\bar{R}$ , полученного усреднением по множеству одинаковых образцов, но с индивидуальными для каждого образца пространственным расположением неоднородностей. Это отличие наз. мезоскопич. флуктуациями и  $\delta R$ . В образцах большого объёма  $V$  мезоскопич. флуктуации малы:  $\bar{R}^2 \approx 1/V$ , и для не слишком больших  $\delta R$  имеет место *Гаусса распределение*. При уменьшении размеров тела  $L$  флуктуации возрастают, пока  $L > L_c \gg a$ , где  $a$  — межатоомное расстояние, а  $L_c$  определяет размер области больших мезоскопич. флуктуаций. При  $L \ll L_c$  величина  $\delta R^2$  не зависит от  $L$  и флуктуации распределения  $\delta R$  (в общем случае) отличаются от гауссовской [1].

Мезоскопич. явления примечательны тем, что благодаря им тело конечного размера обнаруживает свойства, не проявляющиеся в ср. характеристиках. Так, макроскопически изотропное (и негиротропное) тело в результате включения в него случайных неоднородностей тернет и изотропно, и центр инверсии. В результате мезоскопич. флуктуаций в таком теле возможны *фотогальванический эффект*, генерация чётных гармоник, анизотропия сопротивления и т. п.

Изменяя внеш. условия (магн. и электр. поля, давление и т. д.), можно изменять и  $\bar{R}$  и  $\delta R$ . При этом за-

висимость, напр., от магн. поля  $H$  ср. сопротивления  $\bar{R}(H)$  одинакова для всех макроскопически одинаковых образцов (см. *Магнетосопротивление*), а зависимость  $\delta R(H)$  отражает индивидуальность образца. В ряде случаев масштаб  $H$ , на к-ром изменяется  $\delta R(H)$ , значительно меньше, чем для  $\bar{R}(H)$ . При этом зависимость  $R(H)$  имеет вид нерегулярных осцилляций на фоне гладкой кривой (рис.). Нерегулярные осцилляции вос-



производимы и не зависят от предельной (от того, как изменялось  $H$ , прежде чем оно достигло данного значения). При этом ср. значение  $\bar{R}$  по возможным реализациям совпадает со средним по полю  $H$  (см. *Эргодическая теория*):

$$\bar{R}(H) = \lim_{\Delta \rightarrow \infty} \frac{1}{2\Delta} \int_{-\Delta}^{+\Delta} R^2(H + \delta) d\delta.$$

Производная  $\partial R / \partial H$  даже в условиях, когда  $\delta R \ll \bar{R}$ , может полностью определяться мезоскопич. флуктуациями. Напр., для коэф. термодс  $\alpha$ , к-рый определяется логарифмич. производной сопротивления по *химическому потенциалу*  $\mu$ :  $\alpha \sim \partial \ln R(\mu) / \partial \mu$ , возможна ситуация, когда  $\alpha$  в осн. определяется  $M$ . В этом случае  $\alpha$  имеет произвольный знак и нерегулярным осциллирующим образом зависит от  $H$ .

Мезоскопич. эффекты следует учитывать в экспериментах и в практич. приложениях, если  $L_c$  сравнимо с размерами образца  $L$ . Впервые условие  $L_c$  порядка неск. мкм было осуществлено в металлах при низких темп.-рах. Благодаря когерентным эффектам при  $L \ll L_c \ll \sqrt{DhkT}$ , где  $D$  — коэф. диффузии электронов,  $\delta R^2 \sim [e^2(\bar{R})^2/h]^2$ . Наив. ярким проявлением когерентной  $M$  является периодич. зависимость сопротивления металлич. кольца от пронизывающего его магн. потока  $\Phi$  с периодом  $2\pi h/e$  (*Ааронова — Бома эффект* для сопротивления). Такие осцилляции, наблюдавшиеся экспериментально, происходят только за счёт мезоскопич. флуктуаций, имеют случайную фазу и усредняются, если вместо кольца использовать длинный цилиндр.

Мезоскопич. явления возможны в электронных приборах, в к-рых применяется тунелирование электронов через потен. барьер (см., напр., *Туннельный диод*). Барьеры, как правило, оказываются неоднородными, их прозрачность определяется редко расположенными участками малой толщины барьера (проколлами). Ср. расстояние между соседними проколами  $L_c$  велико, и для не слишком большой площади барьера  $S \ll L_c^2$  его прозрачность испытывает гигантские мезоскопич. флуктуации как ф-ция напряжения или магн. поля  $H$  [2].

Фундаментальная важность мезоскопии, явлений связанна с тем, что они позволяют проследить переход от явлений на атомном уровне (микроскопии) к физике макроскопии. Образцов. Прикладное значение М. состоит в том, что с М. связан теоретич. предел миниатюризации электронных приборов, а также в возможности наблюдения событий, происходящих в атомном масштабе (напр., диффузионное смещение отд. атомов), но изменению свойств образцов с размерами  $L_c$ .

Лит.: 1) Washburn S., Webb R. A., Aharonov-Bohm effect in normal metal quantum coherence and transport, «Adv. Phys.», 1986, ч. 35, p. 375; 2) Ра в к М. Э., Р у з и И., Физика прозрачности случайно-неоднородных барьеров конечной площади, «ЖЭТФ», 1987, т. 92, с. 2257. Д. Е. Хмельницкий.

**МЕЗОСФЕРА** (от греч. μέσος — средний и σφαίρα — шар) — слой атмосферы, расположенный между *стратосферой* и *термосферой* на высотах примерно от 50 до 80–90 км. Темп-ра  $T$  в М. понижается с высотой з. т. 260–280 К у её основания до 170–200 К вблизи т. в. м. е. в о п а у з — переходного слоя от М. к термосфере. В Сев. полушарии зима М. в ср. на 20–40 К теплее летней. Вблизи М. в высоких широтах летние темп-ры могут быть ниже зимних на 40–60 К или даже более. Ветер в М. чаще всего дует прил. вдоль широтных кругов; летом он восточный, зимой западный. Набл. скорости локализуются вблизи  $z = 60–70$  км, где они равны 50–60 м/с летом и 70–80 м/с зимой. Летом в средних и высоких широтах на высотах 78–94 км из-за чрезвычайно низких здесь темп-р воздуха иногда возникает т. н. серебристые облака, состоящие из ледяных кристалликов. Форма этих облаков свидетельствует о наличии на них стоячих волн с длиной до деск. десятков км, а также крупных квазистационарных вихревых образований. Газовый состав М., как и нижерасположенных ятн. слоев, постоянен и содержит ок. 80%  $N_2$  и 20%  $O_2$ , т. е. М. является частью гомосферы. В верхней М. расположена б. ч. облака Д. ионосферы.

Лит.: Оксен-атмосфера. Энциклопедия, пер. с англ., Л., 1983; Х р г и я А. Х. Физика атмосферы, М., 1986; Бра с е Г., С о л о м о н С., Аэрономия средней атмосферы, пер. с англ., Л., 1987. С. М. Шметер.

**МЕЙСНЕРА ЭФФЕКТ** — вытеснение пост. магн. поля в массивного проводника, когда последний становится сверхпроводящим, одно из фундам. свойств *сверхпроводимости*. М. э. экспериментально обнаружен Ф. В. Мейснером (F. W. Meißner) и Р. Оксфельдом (R. Ochsensfeld) в 1933.

М. э. исчезает при полном переходе сверхпроводника в нормальное (несверхпроводящее) состояние.

Благодаря возможности существования незаужающих токов в сверхпроводнике внеш. магн. поле проникает в сверхпроводящими токами, текущими вблизи поверхности образца (мейснеровскими токами) в слое толщиной порядка *глубины проникновения* магн. поля (см. *Лондон уравнение*). Состояние с незаужающими поверхностями токами, препятствующими проникновению магн. поля в толщу сверхпроводника, соответствует минимуму свободной энергии, включающей энергию магн. поля, кинетич. энергию сверхпроводящих электронов и энергию свехпроводящей конденсации. Характерные значения глубины проникновения магн. поля составляют доли микрометра, поэтому поле практически не проникает в массивный сверхпроводник; магн. индукция  $B$  в нём равна нулю. В силу соотношения  $B = H + 4\pi M$  между индукцией  $B$ , напряжённостью магн. поля  $H$  и намагниченностью  $M$  последней при  $B = 0$  оказывается равной  $M = -H/4\pi$ , т. е. сверхпроводник в мейснеровском состоянии ведёт себя как идеальный *диамагнетик* с восприимчивостью  $\chi = -1/4\pi$ .

Полный М. э. существует в интервале напряжённостей магн. поля, не превосходящих *критического магнитного поля*, при к-ром происходит полное или частичное разрушение сверхпроводимости. Неполный М. э. наблюдается как в сверхпроводниках 1-го рода в про-

межуточном состоянии, когда магн. поле проникает в образец чеера области, занятые нормальной фазой, так и в сверхпроводниках 2-го рода в интервале полей от  $H_{c1}$  до  $H_{c2}$  (*смешанное состояние*), когда магн. поле проникает в сверхпроводник в виде вихрей, несущих квант магн. потока (см. *Квантование магнитного потока*).

При охлаждении образца, находящегося в магн. поле, до темп-ры ниже критич. темп-ры свехпроводящего перехода происходит выталкивание магн. потока из образца. При этом содержащее магн. поток области нормальной фазы или квантованные вихри стремятся выйти из сверхпроводника, перемещаясь из глубины к поверхности образца. В материалах, обладающих дефектами кристаллич. решётки, такое движение магн. потока может быть затруднено, что будет приводить к «замораживанию» магн. потока в образце.

Лит.: Л я н я и у Л. Д., Л и ф ш и ц Е. М., Электродинамич. свойства сред, 2 изд., М., 1982; Д е Ж и е П., Сверхпроводимость металлов и сплавов, пер. с англ., М., 1966; Р о у з И. С., Р о д е р и к Е., Введение в физику сверхпроводимости, пер. с англ., М., 1972. Н. Б. Лоткин.

**МЕЛЛЕРОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ** — процесс упругого рассеяния электрона на электроне, описываемый низшим порядком теории возмущений в квантовой электродинамике (КЭД). Указанный процесс изображается двумя *Фейнмановскими диаграммами*. В этом приближении не учитываются *радиационные поправки*, а также излучение мягких фотонов, к-рым всегда сопровождается процесс рассеяния заряд. частиц.

Релятивистски-инвариантное выражение для дифференци. сечения М. р. получается согласно известным правилам вычисления элементов  $S$ -матрицы в КЭД (использована система единиц, в к-рой  $c = 1$ ):

$$d\sigma = r_e^2 \frac{4\pi m^2 dt}{s(s-4m^2)} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \frac{s^2 + u^2}{s} + 4m^2(t-m^2) \right] + \frac{1}{4} \left[ \frac{s^2 + t^2}{s} + 4m^2(u-m^2) \right] + \frac{1}{4u} \left( \frac{s}{2} - m^2 \right) \left( \frac{s}{2} - 3m^2 \right) \right\},$$

$$s = (p_1 + p_2)^2, \quad t = (p_1 - q_1)^2, \quad u = (p_1 - q_2)^2,$$

$$p_1 + p_2 = q_1 + q_2, \quad p_1^2 = p_2^2 = q_1^2 = q_2^2 = m^2,$$

где  $p_1, p_2$  и  $q_1, q_2 = 4$ -импульсы электронов в начальном и в конечном состояниях,  $m$  — масса электрона,  $r_e = e^2/4\pi m \approx 2.82 \cdot 10^{-13}$  см — классич. радиус электрона ( $e$  — заряд электрона).

Вводя угол рассеяния  $\theta$  и энергию электронов  $\epsilon$  в центре центра масс, где  $p_1 = -p_2 = p$ ,  $(p_1, q_1) = p^2 \cos^2 \theta$ ,  $\epsilon^2 = p^2 + m^2$ ,  $s = 4\epsilon^2$ ,  $t = -4p^2 \sin^2(\theta/2)$ ,  $u = -4p^2 \cos^2(\theta/2)$ , получим ф-лу Мёллера [Н. К. Мёллер (Ch. Möller), 1932]:

$$d\sigma = r_e^2 \frac{1 + \beta^2}{4\beta^2 v^2} \left[ \frac{4}{\sin^2 \theta} - \frac{3}{1 + \beta^2} + \left( \frac{1 + \beta^2}{1 + \sin^2 \theta} \right)^2 \left( 1 + \frac{4}{\sin^2 \theta} \right) \right] d\Omega,$$

где  $v = \epsilon/m = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ ,  $\beta = |p|/\epsilon$ ,  $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$  — элемент телесного угла.

В нерелятивистском пределе  $\gamma \rightarrow 1$ ,  $\beta \ll 1$ ,  $v = p/m$  это выражение переходит в *Резерфорда формулу* с учётом *обменного взаимодействия* (из-за тождественности электронов) в *барновском приближении* [Н. Ф. Мотт (N. F. Mott), 1930].

$$d\sigma = \frac{e^4}{(16\pi m^2 v^2)^2} \left[ \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} + \cos^4(\theta/2) - \frac{2}{\sin^2(\theta/2)\cos^2(\theta/2)} \right] d\Omega.$$

Для перехода в лаб. систему отсчёта, в к-рой один из электронов покоится, нужно ввести соответствующие нормальные  $(\theta', \phi')$  с помощью соотношений

$$\cos \theta = \frac{2 - (\gamma' + 3) \sin^2 \theta'}{2 + (\gamma' - 1) \sin^2 \theta'}, \quad 2\gamma' = \gamma' + 1, \quad \frac{4\beta'^2 \gamma'}{1 + \beta'^2} = (\beta')^2 \gamma'^2.$$

В рамках стандартной модели *электрослабого взаимодействия*, кроме диаграмм одифотонного обмена (рис.), имеются также диаграммы с обменом нейтральным про-

междуточными векторами безом  $Z^0$ . Однако их вклад в сечение рассеяния электронов из-за большой массы  $Z^0$ -бозона мал.

Лит.: Жаучс Ж. М., Ротшич Ф., The theory of proton and electron, 2-е изд., М., У., 1980; Берестецкий Б. Б., Дифиш и Е. М., Пилатевский Л. П., Квантовая электродинамика, 3 изд., М., 1989. Р. Н. Фаустов.

**МЕЛЛИНА ПРЕОБРАЗОВАНИЕ** — интегральное преобразование, переводящее кусочно-непрерывную функцию  $f(x)$  в  $\Phi$ -цию

$$F(k) = \int_0^{\infty} f(x)x^{k-1} dx, \quad k = p + iq,$$

аналитическую в полосу  $\sigma_1 < p < \sigma_2$ , где положит. числа  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  находят из условия сходимости интегралов  $\int_0^{\infty} |f(x)|x^{\sigma_1-1} dx$  и  $\int_1^{\infty} |f(x)|x^{\sigma_2-1} dx$ . Обратное М. п.

даётся  $\Phi$ -лой

$$\frac{1}{2} [f(x+0) + f(x-0)] = \frac{1}{2\pi i} \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{\nu-1R}^{\rho+1R} F(k)x^{-k} dk.$$

М. п. введено Р. Я. Меллином (R. H. Mellin, 1896) и сводится к Лаласа преобразованию подставкой  $x = \exp(-z)$ . М. п. применяют для решения плоских задач теории упругости, теплопроводности, электростатики и др., а также для анализа интегралов, связанных с Фейнмана диаграммами, в теории перенормировок.

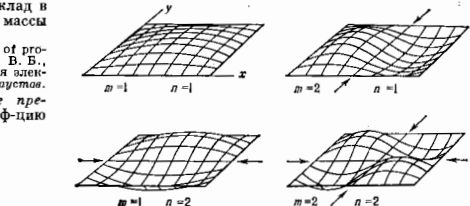


Рис. 1. Форма первых четырех собственных колебаний прямоугольной мембраны; стрелками указаны узловые линии.

Собств. частоты  $\omega_{mn}$  колебаний круглой М. (рис. 2) радиуса  $a$  могут быть найдены из ур-ния

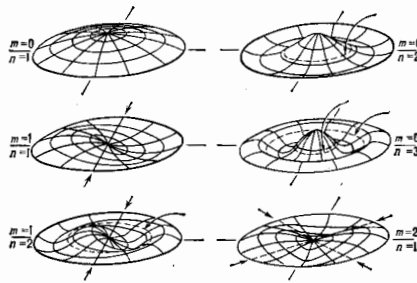


Рис. 2. Форма круглой мембраны для некоторых собственных колебаний; стрелками указаны узловые линии.

**МЕМБРАНА** (от лат. membrana — кожа, перепонка) — гибкая тонкая плёнка, приведенная внеш. силами в состояние натяжения и обладающая вследствие этого упругостью. М. относится к двумерным колеб. системам с распределёнными параметрами. Упругость М. зависит только от её материала и натяжения в отличие от пластинки, упругость к-рой определяется её материалом и толщиной. Отличит. особенностью М. — необходимостью её закрепления по внеш. контуру. Примерами М. являются кожа, натянутая на барабан, тонкая фольга, играющая роль подвижной обкладки конденсаторного микрофона, и др.

Пренебрегая рассеянием энергии, колебания однородной, равномерно натянутой М. можно описывать ур-нием

$$\Delta \eta - \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0,$$

где  $\eta$  — смещение элемента поверхности М. от положения равновесия в направлении нормали к плоскости натяжения,  $\rho$  — поверхностная плотность М.,  $T$  — натяжение,  $\Delta$  — оператор Лаласа. Граничные условия для М.  $\nu = 0$  на внеш. контуре; в качестве нач. условий задается распределение смещений и скоростей точек поверхности М. в нач. момент времени  $t = 0$ . Собственные (свободные) колебания М. представляются системами стоячих волн. Участки М., колеблющиеся с противоположными фазами, разделяются узловыми линиями. Совокупность собств. частот колебаний М. составляет дискретный спектр. Для прямоугол. М. (рис. 1) со сторонами  $a$  и  $b$  собств. частоты выражаются  $\Phi$ -лой

$$\omega_{mn} = \pi \sqrt{\frac{T}{\rho}} \sqrt{\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2}} \quad (m, n = 1, 2, 3, \dots).$$

Частота  $\omega_{11}$  является основной (наименьшей); обертоны  $\omega_{21}$ ,  $\omega_{31}$  и т. д. являются гармониками осн. частоты. Случай  $a = b$  (квадратная М.) наз. вырожденным, в квадратной М. возможно простое гармонич. движение в форме бегущих волн, при этом узловые линии в течение периода последовательно принимают разл. конфигурации.

$$J_k(\omega_{kl} a \sqrt{\frac{\rho}{T}}) = 0 \quad (k = 0, 1, 2, \dots; l = 1, 2, 3, \dots),$$

где  $J_k$  —  $\Phi$ -ция Бесселя 1-го рода  $k$ -го порядка, а  $k$  и  $l$  — числа узловых диаметров и узловых окружностей соответственно. В случае круглой М. ни один из обертонов не является гармоникой осн. частоты  $\omega_{01}$ .

Вынужденные колебания М. происходят с частотой вынуждения, при совпадении к-рой с одной из собств. частот имеет место резонанс. М. представляет собой излучатель звука с неравномерным распределением колеб. скорости по поверхности. Излучение М., возбуждённой на осн. частоте, обладает меньшей направленностью, чем излучение на той же частоте поршневой диафрагмы той же конфигурации.

Лит.: Стретт Дж. В. (Горд Радей), Теория звука, пер. с англ., 2 изд., т. 1, М., 1955; Морз Ф., Колебания и звук, пер. с англ., М.—Л., 1949; Скучик К. Е., Основы акустики, пер. с нем., т. 1, М., 1958. С. В. Егере.

**МЕНДЕЛЕВИЙ** (Mendelevium), Md, — искусственно полученный радиоакт. хим. элемент III группы периодич. системы элементов, ат. номер 101, относится к актиноидам. Известны изотопы М. с массовыми числами 248—252 и 254—259, наиб. устойчив  $\alpha$ -радиоактивный  $^{258}\text{Md}$  ( $T_{1/2} = 55$  сут.). Открыт в США в 1955 по ядерной реакции  $^{253}\text{Es}(\alpha, n)^{258}\text{Md}$ . Предполагаемая электронная конфигурация трёх внеш. оболочек  $5f^6 6d^1 7s^2$ . По оценке, энергия ионизации 6,5 эВ, радиусы ионов  $\text{Md}^+$ ,  $\text{Md}^{2+}$  и  $\text{Md}^{3+}$  равны соответственно 0,119, 0,1045 и 0,092 нм. Электроотрицательность 1,20.

С. С. Вервеско.  
**МЕНИСК** (от греч. meniskos — полумесяц). 1) В олекуллярной физике — искривлённая граница раздела двух фаз (жидкости и пара или двух раз-

породных жидкостей) вблизи границы их соприкосновения с твердым телом (напр., у стенок сосуда). В капиллярных трубках в инерциальных системах отсчета для изотропных жидк. М. имеет сферич. форму — вогнутую при наличии смачивания и выпуклую при его отсутствии. Давление паров над вогнутой поверхностью ниже, а над выпуклой выше, чем над плоской границей раздела; разность этих давлений наз. *лапласовским давлением*. Радиус М. связан с лапласовским давлением *Лапласа уравнением*. Существованием лапласовского давления объясняются всасывание жидкости в капилляры, капиллярная конденсация и др. *капиллярные явления*.

2) В оптике — выпукло-вогнутая линза, ограниченная двумя сферами. Поверхностями; один из наиб. распространенных типов *линз*. М., толщина к-рого к центру больше, чем на краях, — собирающая линза; при толщине, на края большей, чем в центре, — рассеивающая линза. М. используется в очках, в объективах (в качестве пасадочных линз для изменения фокусного расстояния), для компенсации аберраций оптич. систем (см. *Менисковая система*).

**МЕНИСКОВАЯ СИСТЕМА** — разновидность *зеркально-линзовых систем*, в к-рой для компенсации аберраций зеркала (или зеркала) используется расположенный перед ним мениск (выпукло-вогнутая или вогнуто-выпуклая линза). М. с. изобретены в 1941 Д. Д. Макустовым и независимо Д. Габором (D. Gabor). Простейшая М. с., называемая также *системой Макустова* (рис. 1), состоит из одного ахроматич. мениска и сферич. вогнутого зеркала. Мениск обладает малой *оптической силой*, и его осн. назначение — компенсировать *сферическую аберрацию* зеркала. При определ. соотношении  $[(R_1 - R_2)/d \approx 0,6]$  между радиусами  $R_1$  и  $R_2$  оптич. поверхность мениска и толщиной мениска  $d$  достигается ахроматизация, что мениск;  $s$  — сферическое

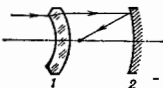


Рис. 1. Простейшая менисковая система: 1 — выпуклый мениск; 2 — сферическое зеркало.

обеспечивает получение высококачественного изображения в широкой области спектра. Кому исправляют подбором расстояния между мениском и зеркалом. Для М. с. на рис. 1 это расстояние примерно равно её фокусному расстоянию. Прототипом простейшей М. с. является зеркально-линзовый объектив Шмидта, по сравнению с к-рым М. с. более технологична (т. к. все оптич. поверхности сферические) и обладает в 2 раза меньшей длиной. Существ. недостаток простейшей М. с. — наличие значит. *кривизны поля изображения*, радиус к-рого примерно равен фокусному расстоянию М. с. Применение М. с. в качестве объективов астр. телескопов (т. н. менисковых *телескопов* или *телескопов Макустова*) целесообразно при отн. отк. объективах 1:2 и фокусных расстояниях, не превышающих 2 м.

Широко распространение получили М. с. в качестве телеобъективов для зеркальных фотоаппаратов. На рис. 2 представлен менисковый телеобъектив МТО-500 с фокусным расстоянием 500 мм и отн. отк. объектива 1:8, представляющий собой двухзеркальный объектив типа Кассегрена (см. *Объектив*) с 2 компенсаторами: менисковым (1) и двуклинновым (2), расположенным в сходящемся пучке лучей и устраняющим кривизну поля изображения.

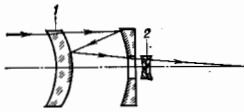


Рис. 2.

Лит.: Волосов Д. С., Теория менисковых систем, ИТФ, 1943, т. 15, в. 1—2. А. П. Грамматин.

**МЕРА ДИСПЕРСИИ** ( $DM$ ) — величина, определяющая запаздывание импульсов излучения космич. объектов. Задержка радиоизлучения обусловлена тем, что показатель преломления плазмы зависит от длины волны  $\lambda$  (см. *Дисперсия волн*). Длинные волны распространяются медленнее коротких, поэтому сигнал, излученный одновременно на разных  $\lambda$ , приходит к наблюдателю на длинных волнах позже, чем на коротких. Величина запаздывания

$$\Delta t = \frac{e^2 (\lambda_1^2 - \lambda_2^2)}{2\pi m c^3} DM \approx 4,6 \left( \lambda_1^2 - \lambda_2^2 \right) DM [\text{мкс}],$$

где  $\lambda$  выражена в см. М. д. равна полному числу электронов на луче зрения (от объекта до наблюдателя) в столбике сечением 1 см<sup>2</sup>

$$DM = \int_0^L N_e dl = \bar{N}_e L,$$

где  $N_e$  — концентрация электронов,  $dl$  — элемент длины вдоль луча зрения,  $\bar{N}_e$  — ср. значение  $N_e$ ,  $L$  — расстояние до области генерации излучения. Обычно  $L$  измеряют в парсеках, а  $N_e$  в см<sup>-3</sup>, так что единичный М. д. служит пк/см<sup>3</sup>. Единств. типом астрофиз. объектов, для к-рых запаздывание импульсов поддается измерениям, являются пульсары. Обычно для пульсаров  $10 \text{ пк/см}^3 \lesssim DM \lesssim 500 \text{ пк/см}^3$ . Т. к. наблюдения всегда ведутся в некой полосе длин волн, наличие запаздывания мешает изучению тонкой временной структуры импульсов пульсаров.

Осн. часть М. д. набирается в межзвёздном газе. Поэтому измерение М. д. даёт возможность изучать распределение электронов в межзвёздном газе Галактики. Н. Г. Бочкарёв.

**МЕРКУРИЙ** — ближайшая к Солнцу большая планета Солнечной системы. Ср. расстояние от Солнца 0,387 а. е. (57,9 млн. км). Эксцентриситет орбиты 0,2056 (расстояние в перигелии 46 млн. км, в афелии 70 млн. км). Наклон плоскости орбиты к эклиптике 7°. Период обращения М. вокруг Солнца (меркурианский год) 87 сут 23 ч 16 мин. Фигура М. близка к шару с радиусом на экваторе (2440 ± 2) км. Масса М.  $\approx 3,34 \cdot 10^{23}$  кг (0,054 массы Земли). Ср. плотность 5440 кг/м<sup>3</sup>. Ускорение свободного падения на поверхности М. 3,7 м/с<sup>2</sup>. Средняя *космическая скорость* на М. 3 км/с, вторая — 4,3 км/с. Период вращения М. вокруг своей оси равен 58,6461 ± ± 0,0005 сут. Он соответствует устойчивому режиму, при к-ром период вращения равен 2/3 периода орбитального обращения (58,6462 сут). В этом случае малая ось эллипсоида инерции планеты при прохождении ею перигелия совпадает с направлением на Солнце. Это — вариант резонанса, вызванного действием солнечного притяжения на планету, распределение массы внутри к-рой не является строго концентрическим. Определяемая совокупным действием вращения и обращения по орбите длительность солнечных суток на М. равна трём звёздным меркурианским суткам, или двум меркурианским годам, и составляет 175,92 ср. земных суток. Наклон экватора к плоскости орбиты незначителен ( $\approx 3^\circ$ ), поэтому сезонные изменения практически отсутствуют.

Поверхность М. довольно тёмная: показатель цвета соответствует тёмно-бурой окраске. Видимый контраст деталей несколько меньше, чем в случае контрастов «морских» и «материковых» участков на Луне. Визуальное *альbedo* равно 0,056, интегральное — 0,09. Кривые изменения относительной яркости в зависимости от угла фазы для М. и Луны практически совпадают, спектральная отражат. способность с возрастанием длины волны до 1,6 мкм увеличивается. Эти данные позволяют предполагать, что поверхность М. покрыта раздробленным веществом базальтового типа, подобным лунно-

му регулюти (см. Луна); причной низкого альbedo может быть обогащённая регулита железом и титаном. Радиоастр. и полйриад. исследования также указывают на сходство микроструктуры поверхности М. и Луны.

Кол-во солнечной эвергии, получаемой М. в перигелии, примерно вдвое больше, чем в афелии, и в среднем в 10 раз больше, чем на Земле ( $\approx 14$  кВт/м<sup>2</sup>). С большой длительностью дня и ночи связано резкое различие темп-р на темной и освещённой сторонах планеты, а низкое альbedo способствует сильному нагреванию поверхности в течение дня. На ср. расстоянии от Солнца *кривая температура* в ИК-диапазоне в подсолнечной точке соответствует излучению абсолютно чёрного тела при темп-ре 813 К (см. Паанка закон излучения). Темп-ра поверхности на ночной стороне (111 ± 3) К. Теплофиз. поведение наружного покрова М. свидетельствует о его чрезвычайно низкой теплопроводности. Темп-ра на глубинах в десятки см, о к-рой можно судить по радиоизлучению М., не обнаруживает заметных изменений. По результатам радиолокац. исследований (измерение диэлектрич. проницаемости) плотность поверхностного слоя оценена в 1500 ± ± 400 кг/м<sup>3</sup>.

При трёх последоват. пролётах около планеты космич. аппарата (КА) «Маринер-10» (США) получены фототелевизионные изображения примерно 1/3 поверхности М. Обилие кратеров ударного происхождения — наиб. характерная черта сотысятк районов. Морфология кратеров, их плотность и распределение по размерам близки к лунным, степень эрозии и сглаживания невелика, о чём свидетельствуют сохранившиеся лучевые структуры. В целом кратеры на М. менее глубокие, чем лунные, что, видимо, связано с большим значением силы тяжести на М. и более эфф. заполнением кратера материалом, выбрасываемым при ударе метеорита. На поверхности хорошо сохранились как самые древние, так и более поздние структуры, видны эскарпы, простирающиеся на расстояния в сотни км, что интерпретируется как указание на эволюцию планеты в ходе гравитаци. дифференциации и последующего сжатия при остывании массивного железонакаленного ядра.

Атмосфера у М. по существу отсутствует. Давление газов у поверхности оценено по результатам радиопросвечивания и данным УФ-измерений с космич. аппарата, оно оказалось равным 0,2 нПа (плотность менее 0,01 г/м<sup>3</sup>). Обнаружен He с парциальным давлением 0,02 нПа, установленны верх. пределы содержания H, CO<sub>2</sub>, C, O, Ne, Ar, Xe. В создании и поддержании атмосферы М. определяющую роль играет, очевидно, *солнечный ветер*, являющийся поставщиком протонов,  $\alpha$ -частиц и более тяжёлых ядер.

У М. обнаружено заметное магн. поле с напряжённостью на поверхности у экватора  $\approx 0,28$  А/м. Напряжённость магн. поля у полюсов вдвое выше. Ось магн. диполя планеты наклонена к оси вращения М. на угол  $\approx 12^\circ$ . М. обладает магнитосферой, к-рая сильно поджата к планете (см. *Магнитосферы планет*).

М. А. Маров.

**МЕРМИНА — ВАГНЕРА ТЕОРЕМА** — утверждает невозможность ферро- или антиферромагн. упорядочения в одно- и двумерной рёшётке спинов S, описываемой изотропной Гейзенберга моделью, при темп-рах  $T \approx 0$  [1]. Разумеется, М.—В. т. не исключает магн. упорядочения в реальных квазиодно- и двумерных системах (в силу их конечности, а также анизотропии), где условия теоремы, как правило, не выполняются. В частности, магн. упорядочение возникает в рёшётках, соответствующих двумерной *Изинга модели*.

Утверждения, вналогичные М.—В. т., справедливы также для спонтанного параметра порядка в др. низкоразмерных системах, в частности для явлений сверхпроводимости и сверхтекучести [2].

Доказательство М.—В. т. основано на неравенстве Боголюбова для статистич. средних. Подстановка в него Фурье-компонент операторов спиновой плотности и гамма-функции Гейзенберга даёт для двумерной рёшётки спинов

$$m_z^2 < \frac{2\pi\rho}{k^2} \cdot \frac{\omega}{kT} \cdot \frac{S(S+1)}{\ln(1 + \omega/|hm_z|)}, \quad (4)$$

для одномерной рёшётки спинов

$$|m_z|^2 < |h| \omega \left[ \frac{S(S+1)}{2hT \text{Arctg}(\omega/|hm_z|)^{1/2}} \right]^2. \quad (2)$$

В ф-лах (1) и (2)  $h$  — внеш. магн. поле,  $m_z$  — намагниченность (для случая антиферромагнетизма — намагниченность *магнитной подрёшётки*),  $k_0$  — граничный вектор Бриллюэна зона,  $\rho^{-1}$  — объём, приходящийся на один спин, и  $\omega = k^2 S(S+1) \sum_{\mathbf{R}} J(\mathbf{R})$  [конечность  $\omega$ , т. е. достаточно быстрое спадание обменного взаимодействия  $J(\mathbf{R})$  с расстоянием  $\mathbf{R}$ , является условием теоремы].

Из (1) и (2) следует, что при  $h \rightarrow 0$  намагниченность исчезает. Физически этот результат связан с сильным развитием для низкоразмерных систем ДВ-флуктуаций, разрушающих дальний порядок (ср. квадратичная флуктуация  $\delta m_z^2 \rightarrow 0$ ).

М.—В. т. запрещается возникновение спонтанной намагниченности, но не др. фазовые переходы. В частности, состояние с  $m_z = 0$ , но с восприимчивостью  $(\partial m_z^2 / \partial h)_T \rightarrow \infty$  при  $h \rightarrow 0$  не противоречит (1) и (2). Такой переход, связанный с изменением асимптотики корреляц. ф-ций, действительно имеет место для двумерных систем при нек-рой темп-ре  $T_s$ . Для одномерных систем фазовые переходы отсутствуют вплоть до  $T = 0$ .

Лит.: 1) Mermin N., Wagner H., Absence of ferromagnetism of antiferromagnetism in one- or two-dimensional isotropic Heisenberg models, Phys. Rev. Lett., 1966, v. 17, p. 1133 (рус. пер. в кн.: Маттис Д., Теория магнетизма, М., 1967, с. 399—403); 2) Пататинский А. З., Покровский В. Л., Флуктуационная теория фазовых переходов, 2 изд., М., 1982, с. 177—182; Ю. П. Изин, В. Ю. Изин, **МЕРМОРОФНАЯ ФУНКЦИЯ** — аналитическая функция, не имеющая в комплексной плоскости особенностей кроме полюсов. В частности, любая *целая функция* или рациональная ф-ция является М. ф. Кол-во полюсов у М. ф. не более чем счёто. Если М. ф.  $f(z)$  имеет конечное число полюсов и выполняется оценка  $|f(z)| \leq C|z|^m$ ,  $|z| \geq R$  при нек-рых  $R > 0$ ,  $C > 0$  и  $m \geq 0$ , то  $f(z)$  — рациональная ф-ция. Если М. ф. имеет бесконечное число полюсов, расположенных в точках  $z_k$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , то обязательно  $z_k \rightarrow \infty$ , при  $k \rightarrow \infty$ . Для того чтобы  $f(z)$  была М. ф., необходимо и достаточно, чтобы она представлялась в виде отношения двух целых ф-ций.

Справедлива теорема Миттаг-Леффлера. Пусть задана нек-рая конечная или бесконечная последовательность точек  $z_k$ ,  $k = 1, 2, \dots$  и последовательность комплексных чисел  $c_{kj}$ ,  $k = 1, 2, \dots$ ,  $j = 1, 2, \dots, m_k$ . Тогда существует М. ф.  $h(z)$ , к-рая имеет полюсы только в точках  $z_k$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , причём гл. часть Лорана ряда  $f(z)$  в точке  $z_k$  совпадает с ф-цией

$$h_k(z) = \sum_{j=1}^{m_k} c_{kj}(z - z_k)^{-j}, \quad k = 1, 2, \dots$$

Ф-цию  $h(z)$  можно представить в виде суммы рядов

$$h(z) = \sum_k (h_k(z) - P_k(z)),$$

где  $P_k(z)$ ,  $k = 1, 2, \dots$  — нек-рые полиномы. Обратво, всякая М. ф.  $f(z)$ , имеющая полюсы в точках  $z_k$ ,  $k = 1, 2, \dots$  с гл. частями ряда Лорана  $h_k(z)$ , отличается от ф-ции  $h(z)$  на целую ф-цию.

Напр., ф-ция  $f(z) = ctgz$  является М. ф. и имеет простые полюсы в точках  $z_n = \pi n$ ,  $n = 0, \pm 1, \dots$  с гл. частями  $h_n = (z - \pi n)^{-1}$ . Для неё имеет место предствление

$$ctgz = \frac{1}{z} + \sum_{n \neq 0} \left( \frac{1}{z - \pi n} + \frac{1}{\pi n} \right).$$

М. ф.  $ctgz^2$  имеет полюсы второго порядка в тех же точках  $z_n = \pi n$ ,  $n = 0, \pm 1, \dots$  с гл. частями ряда Лорана  $h_n = (z - \pi n)^{-2}$ . Соответственно разложение для неё имеет вид

$$ctgz^2 = -1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} (z - \pi n)^{-2}.$$

Лит. см. при ст. Аналитическая функция. Б. Н. Завьялов.

**МЕРЦАНИИ МЕТОД** — метод определения параметров турбулентной среды и источника, к-рым просеивается среда, на основе измерения статистич. характеристик флукутаций потока излучения, вызванных модульцией волн неоднородностями показателя преломления. Метод базируется на теории распространения волн в средах с показателем преломления, являющимся случайной ф-цией координат  $r$  (см. Распространение радиоволн в случайном неоднородных средах). Развитие возмущений поля волны начинается с развития фазовых возмущений, затем эффекты фокусировки, дифракции и интерференции приводят к появлению флукутаций потока — мерцаниям (см. Мерцания радиоволн). Различают два режима мерцаний: режим слабых и режим сильных (насыщенных) мерцаний. Движение среды относительно луча зрения преобразует пространств. флукутации во временные.

Измеряемыми характеристиками флукутаций потока излучения  $N$  являются индекс мерцаний  $m = \sqrt{\langle (N - \langle N \rangle)^2 \rangle} / \langle N \rangle$  (угл. скобки обозначают ср. значение), корреляционная функция  $B_N(\Delta r, \Delta t)$ , где двумерный вектор  $\Delta r$  характеризует относительное положение точек измерения в картинной (шормальной) плоскости,  $\Delta t$  — разность времён наблюдения. Измеряют также пространственную  $M_N(q)$  и временную  $M_N(f)$  спектральные ф-ции — Фурье преобразования  $B_N$  по  $\Delta r$  и  $\Delta t$  [ $q = (q_x, q_y, q_z)$ , где  $q_x, q_y, q_z$  — пространственные частоты,  $f$  — временная частота]. Наблюдения мерцаний проводят обычно на одиночных оптич. телескопах или радиотелескопах, реже используют систему из неск. инструментов (интерферометры).

Определение параметров среды. Среда характеризуется коррел. ф-цией флукутаций показателя преломления  $B_n(\Delta r)$  и спектральной ф-цией  $\Phi_n(q)$  — преобразованием Фурье  $B_n$  по  $\Delta r$ . Залата восстановления характеристик среды по данным мерцаний имеет неоднозначное решение, поэтому вводят дополнит. предположения о модели среды и из сравнения теории с наблюдениями делают вывод о правильности или неправильности модели.

В режиме слабых мерцаний флукутации потока описываются теорией возмущений в первом порядке, поэтому пространств. спектры флукутаций потока и показателя преломления связаны линейным соотношением. Для случая бесконечно удалённого точечного источника это соотношение имеет вид

$$M_N(q_x, q_y) = 8\pi k^2 \int_0^z dz' \sin^2 \left[ \left( \frac{q_x^2}{4} + \frac{q_y^2}{4} \right) (z - z') / 2k \right] \times \times \Phi_n(q_x, q_y, q_z = 0),$$

где  $k = 2\pi\lambda$  — волновое число, ось  $z$  ориентирована вдоль луча зрения, интегрирование ведётся от источника к наблюдателю. Это соотношение используется для восстановления вида спектра  $\Phi_n$  по наблюдаемому

спектру мерцаний источника  $M_N$ . Обычно измеряют временной спектр, к-рый в отличие от пространственного является одомерным. В простейшем случае однородного движения среды со скоростью  $v$  поперёк луча зрения временной спектр может быть получен из пространственного интегрированием по перемещной, нормальной вектору скорости, напр.  $q_y$ , а переменная  $q_x$  заменяется на  $2\pi f/v$ . М. м. является наб. информативным в интервале пространств. частот, прилегающих к частоте  $\sqrt{k/v}$ . Почти для всех типов сред (атмосфера, ионосфера, межпланетная и межзвёздная плазмы) характерны спектры показателя преломления степенного вида. Для этих сред характерные пространств. масштабы мерцаний бьваки к масштабу Френеля  $a_0 = \sqrt{2/k}$ . В метровом диапазоне радиоволн  $a_0 \sim 1$  км для ионосферы,  $\sim 100$  км для межпланетной плазмы и  $\sim 10^8$  м для межзвёздной плазмы. Характерные времена мерцаний — минуты для ионосферы и межзвёздной плазмы, секунды для межпланетной плазмы.

Зондирю среду в разных направлениях, можно изучать крупномасштабную структуру уровня турбулентности. Методом картографирования индексов мерцаний плазмы крупномасштабная структура межпланетной плазмы (рис. 1), ионосферы.



Рис. 1. Структура межпланетной плазмы, полученная по измерениям индексов мерцаний 150 радиосточников. Усиление плотности штрихов соответствует увеличению индекса мерцаний.  $\alpha$  и  $\beta$  — прямое восхождение и склонение. В незашифрованных областях измерения отсутствуют. Точкой показано положение Солнца.

В режиме насыщенных мерцаний индекс мерцаний близок к 1 и слабо зависит от параметров среды. Информация о среде содержится в пространственном и временном масштабах, в корреляц. и спектральной ф-циях. В этом режиме возникает тонкая структура модуляции потока при изменении несущей частоты волны. Корреляция флукутаций потока на двух равнечастотных частотах зависит от вида спектра турбулентности и от распределения турбулентной среды по лучу зрения. Осн. информация о спектре неоднородностей межзвёздной плазмы дали наблюдения мерцаний пульсаров в режиме насыщения.

Измеряя корреляцию мерцаний в разнесённых точках, получают скорость движения среды или источника. В простейшем случае однородного движения со скоростью  $v$  имеем

$$B_N(\Delta r_1, \Delta t) = B_N(\Delta r_1 - v_1 \Delta t),$$

$\Delta r_1$  и  $v_1$  — проекции разности координат и скорости на картинную плоскость. Этим методом измерены скорость солнечного ветра, скорости движения пульсаров.

Определение параметров источника излучения. Исходное излучение источника характеризуется распределением яркости  $I(b)$ , где  $b = (\Delta\alpha, \Delta\delta)$  — угловое угл. координат от ср. направления на источник. Используют также ф-цию видности, или ф-цию когерентности поля  $B_E(\Delta r_1)$ , к-рая представляет собой отклик интерферометра с базой  $\Delta r_1$  и связана с  $I(b)$  преобразованием Фурье. При восстановлении распределения яркости по источнику наб. информативными являются мерцания на геометрически тонком слое случайно



преломляющей среды (фазовом экране). В этом случае между пространств. спектром мерцаний и ф-цией видности имеется простое соотношение:

$$M_H(\theta) = M_{H_0}(\theta) |E_E(qz/k)|^2,$$

где  $M_{H_0}$  — спектр мерцаний точечного источника с единичным потоком. Аналогичное соотношение справедливо и в случае флуктуаций потока в фокусе оптич. телескопа, оно служит основой метода *стекла-интерферометрии*, к-рый позволяет исключить влияние турбулентной атмосферы на изображение астр. объекта. В случае протяжённой среды в режиме слабых мерцаний приведённое выше выражение можно распространить на вклад слоя малой толщины  $\Delta z$ , а суммарный спектр определяется интегралом по  $z$ . Возможности восстановления распределения яркости по источнику в случае протяжённой среды сужаются (непосредственно определяют лишь угл. размеры источника, рис. 2), но тем не менее можно проводить модельное восстановление с включением в модель нек. свободных параметров.

В режиме насыщенных мерцаний в случае протяжённой среды вид спектра мер-

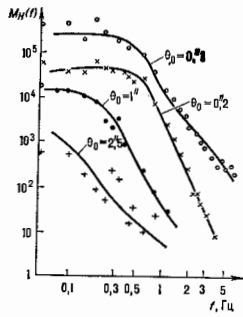


Рис. 2. Влияние угловых размеров источника  $\theta_0$  на временные спектры межпланетных мерцаний. Сплошные линии — теоретические; точки — данные наблюдения, полученные на длине волны  $\lambda = 3$  м, на угловых расстояниях от Солнца  $30^\circ \pm 40'$ ,  $\circ$  —  $3C 43$ ,  $\times$  —  $3C 119$ ,  $\bullet$  —  $3C 68, 2$ ,  $+$  —  $3C 154$ .

цаний практически не зависит от угл. размеров источника  $\theta_0$ . Осн. информация об источнике содержится в индексе мерцаний, к-рый убывает с увеличением  $\theta_0$ . Для больших значений  $\theta_0$   $m \sim 1/\theta_0$ .

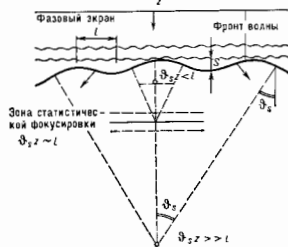
В качестве ориентировки для оценки разрешения М. м. может служить угл. размер первой зоны Френеля,  $\theta_F = \sqrt{1/kz}$ . В метровом диапазоне радиоволн в ионосфере  $\theta_F \approx 3'$ , в межзвездной плазме  $\sim 1''$ , в межзвездной плазме  $\sim 10^{-2}''$ . При исследовании мерцаний пульсаров достигнуто рекордное угл. разрешение  $\sim 10^{-7}''$ .

Лит.: Чернов Л. А. Волны в случайно-неоднородных средах. М., 1975; Введение в статистическую радиофизику, ч. 2 — Рытов С. М., Крауцов Ю. А., Татарский В. И., Суханов В. И., Суворов В. И., Волны в случайно-неоднородных средах, в кн.: Итоги науки и техники. Радиофизика. Физические основы электроники. Августина, т. 1, М., 1981; Гершман В. Н., Ерухимов Л. М., Ниши Ю. Я., Волновые явления в ионосфере и космической плазме, М., 1984.

**МЕРЦАНИЯ РАДИОВОЛН** — вариации интенсивности радиоволн во времени, вызванные случайными неоднородностями среды (показателя преломления  $n$ ); явление, аналогичное мерцанию звезд. М. п. возникают в результате фокусировки, дифракции, а также интерференции радиоволн, рассеянных разными неоднородностями. На рис. изображено возникновение амплитудных флуктуаций за толстым непоглощающим слоем с неоднородностями (случайным фазовым экраном), за к-рым появляются случайные искажения фазового фронта волны, обусловленные флуктуациями её фазы  $s$

в слое. При этом  $s = k_0 \int_0^L n(z) dz$  ( $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны в вакууме,  $L$  — толщина слоя), а угол  $\theta \approx k_0^{-1} \partial s / \partial x$  при  $\theta_0 \ll 1$ . На малых расстояниях  $z$

от слоя изменение интенсивности волн вдоль оси  $z$  (или во времени, при движении неоднородностей вдоль  $z$ ) происходит за счёт суммирования или расширения лучевой трубки и пропорц.  $\partial \theta_0 / \partial z \sim z s_0 / k_0 l^2 (s_0^2 - \text{дисперсия } s, l — \text{радиус корреляции неоднородностей})$ . Изменение максимально по  $z$ , примерно равно фокусному расстоянию  $z_0 = (\partial \theta_0 / \partial z)^{-1}$ ,  $z s_0 / k_0 l^2 \sim 1$  (область



статистич. фокусировки). При  $z \gg z_0$  в точку ириёма приходят радиоволны от разл. неоднородностей, а флуктуация возникает в результате интерференции рассеянных волн. В этом случае величина флуктуаций интенсивности  $(\Delta I^2 / I^2)$  определяется только значением  $s_0$ , при  $s_0 \gg 1$  она насыщается (область насыщенных мерцаний) подобно флуктуациям сигнала, состоящего из мн. некоррелированных случайных компонент.

М. п. являются одной из причин *замирания* сигналов при *распространении радиоволн* в ионосфере и тропосфере, их используют для изучения неоднородностей среды, особенно межзвездной и межпланетной плазмы. Если угл. размеры источника излучения существенно превышают угл. размеры неоднородностей среды, ответственных за М. п., то флуктуации вследствие пространств. усреднения сглаживаются и М. п. исчезают. Этот эффект лежит в основе одного из методов определения угл. размеров дискретных космич. радиисточников; метод особенно эффективен при использовании неоднородностей солнечного ветра и межзвездной плазмы.

**МЁССБАУЭРА ЭФФЕКТ** (ядерный  $\gamma$ -резонанс) — испускание или поглощение  $\gamma$ -квантов атомными ядрами в твёрдом теле (обусловленное ядерными переходами), не сопровождающееся изменением колеб. энергии тела, т. е. испусканием или поглощением фононов (без отдачи). Открыт Р. Мёссбауером (R. Mössbauer) в 1958. Таким переходам соответствуют линии испускания и поглощения  $\gamma$ -лучей, обладающие естеств. шириной  $\Gamma = \hbar/\tau$ , где  $\tau$  — ср. время жизни возбуждённого состояния ядра, участвующего в  $\gamma$ -переходе (см. *Ширина спектральной линии*), и энергий  $E_0$ , равной энергии перехода. Благодаря М. э. стали возможны измерения спектров испускания, поглощения и резонансного рассеяния  $\gamma$ -квантов низколежащих (  $E_0 < 200$  кэВ) и долгоживущих возбуждённых ядерных уровней ( $\tau = 10^{-12} - 10^{-11}$  с) с разрешением порядка естеств. ширины уровня  $\Gamma$ .

М. э. наблюдается для 73 изотопов 41 элемента. Получены линии с рекордно малыми значениями отношения  $\Gamma/E_0 \sim 10^{-14}$ . С помощью таких линий стали возможны измерения гравитационного красного смещения спектральных линий в земных условиях, деформации М. э. проявившиеся лишь в астр. наблюдениях.

Малые величины абс. значений  $\Gamma$  ( $10^{-8}$ – $10^{-10}$  эВ) позволяют проводить измерения сдвигов и расщеплений линий, обусловленных взаимодействием ядра с внутренними электрич. и магн. полями и тем самым получать информацию о структуре, составе, хим. связи и магн. свойствах вещества, содержащего резонансный нуклид. Измерения вероятности М. э., т. е. доли испущенных или поглощенных  $\gamma$ -квантов без отдачи, и её зависимости от темп-ры  $T$  позволяют получить сведения об особенностях взаимодействия атомов в твёрдых телах и о колебаниях кристаллической решётки (напр., о фононном спектре). Благодаря этому М. э. широко применяется как метод исследования твёрдых тел с приложениями в разл. областях науки и техники (см. Мессбауэровская спектроскопия). За открытие М. э. в 1962 Р. Мессбауэру присуждена Нобелевская премия.

Природа М. э. При испускании или поглощении  $\gamma$ -кванта свободное неподвижное ядро приобретает импульс  $p = E/c$ , где  $E$  — энергия  $\gamma$ -кванта, и энергию поступат. движения  $R = p^2/2M$ , где  $M$  — масса ядра. В результате энергия испускаемых  $\gamma$ -квантов оказывается меньше энергии ядерного перехода  $\epsilon_0$  на величину  $R$ ; резонансно поглощаются  $\gamma$ -кванты с энергией, большей  $\epsilon_0$  на ту же величину. Т. о., линии испускания и поглощения смещены друг относительно друга на  $2R$ . В газах за счёт теплового движения и Допплера эффекта происходит уширение  $\gamma$ -линий на величину  $\Delta = 2V/\sqrt{RkT}$  и их небольшое перекрытие (рис. 1, а). Для

$\alpha$ , подверженный за счёт движения ядра фазовой модуляции. Электрич. поле излучаемой волны

$$E(t) = \epsilon_0 \exp \left[ -i\omega_0 t - \frac{\alpha^2}{2} + ikr(t) \right]. \quad (1)$$

Здесь  $\epsilon_0$  — константа,  $k$  — волновой вектор  $\gamma$ -кванта,  $r$  — координата ядра в момент  $t$ . Несмещённая линия естеств. ширины появляется при таких движениях ядра, когда среднее по времени  $\Delta t$  от фазового множителя отлично от 0, т. е.:

$$A_M = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \exp \{ ikr(t) \} dt \neq 0. \quad (2)$$

Величина  $f_M = |A_M|^2$  определяет интенсивность несмещённой линии и названа фактором Мессбауэра. Если ядро движется в огранич. пространстве, то только при спец. типах движения  $A_M = 0$ . В подавляющем большинстве случаев  $A_M = 0$ . Колебат. движение ядра в твёрдых телах носит огранич. характер, и в приближении гармонич. колебаний

$$f_M = \exp \left( -\bar{x}^2/\lambda^2 \right), \quad (3)$$

где  $\bar{x}^2$  — ср. квадрат смещения ядра от положения равновесия в направлении полёта  $\gamma$ -квантов;  $\lambda = hc/\epsilon_0$  — приведённая длина волны излучателя.

Квантовомеханич. рассмотрение приводит также к ф-ле (3), но позволяет учесть при вычислении  $\bar{x}^2$  как тепловые, так и нулевые колебания атомов. Фактор Мессбауэра во многом аналогичен Дебая — Уоллера фактору, определяющему вероятность упругого рассеяния рентг. лучей и нейтронов в твёрдых телах. С ростом темп-ры  $\bar{x}^2$  увеличивается, а  $f_M$  падает. Характер зависимости  $f_M(T)$  определяется мн. факторами: значениями силовых констант, составом и структурой кристалла и т. п. Однако для  $\gamma$ -переходов низких энергий  $f_M$  сохраняет заметную величину вплоть до темп-ры плавления. С увеличением  $\epsilon_0$  (уменьшением  $\lambda$ )  $f_M$  резко падает, и для сохранения достоянной измерению величины  $f_M$  источник и поглотитель обычно охлаждаются до  $T = 4,2$  К. При  $T \rightarrow 0$  К за счёт нулевых колебаний  $\bar{x}^2$  остаётся конечным, и это обстоятельство ограничивает возможности наблюдения несмещённой линии для переходов с большими  $\epsilon_0$ .

В жидкостях атомы или молекулы за счёт диффузии могут перемещаться на сколь угодно большие расстояния, поэтому наблюдают несмещённую линию естеств. ширины в жидкостях великая. Однако т. к. время жизни возбуждённого ядерного уровня конечно, то если смещение за время  $t$  мало или сравнимо с  $\lambda$ , спектры испускания и поглощения  $\gamma$ -квантов не должны сильно отличаться от соответствующих спектров твёрдых тел. Анализ показывает, что при учёте как колебательного, так и диффузионного движений в спектрах поглощения и испускания содержится несмещённая линия, но уширенная на величину  $\Delta\Gamma = 2kD/\lambda^2$ , где  $D$  — коэф. диффузии (рис. 1, е). Для большинства жидкостей  $D$  велики, а линии поглощения и испускания сильно уширены, и их наблюдение затруднено. Исключение составляют жидкости с большой вязкостью. В твёрдых телах при высоких  $T$  также наблюдается заметное уширение несмещённой линии за счёт диффузии.

В твёрдых телах часть спектра испускания и поглощения соответствует процессам с отдачей, т. е. с возбуждением или поглощением фононов. Эта часть распределена по интервалу энергий  $\Delta\epsilon = k\omega_0$ , где  $\omega_0$  — характерная частота фононного спектра. Эта часть распределения деталей этого распределения невозможна. Исключения составляют случаи, когда в  $\Gamma(t)$  сильно представлены гармоники с НЧ. Если, напр., возбудить УЗ-колебания достаточно большой интенсивности с частотой  $\Omega$ , то в спектрах поглощения и

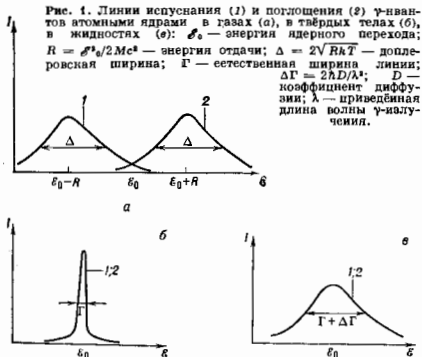


Рис. 1. Линии испускания (1) и поглощения (2)  $\gamma$ -квантов атомными ядрами в газах (а), в твёрдых телах (б), в жидкостях (в):  $\epsilon_0$  — энергия ядерного перехода;  $R = \epsilon_0^2/2Mc^2$  — энергия отдачи;  $\Delta = 2V/\sqrt{RkT}$  — доплеровская ширина;  $\Gamma$  — естественная ширина линии;  $\Delta\Gamma = 2kD/\lambda^2$  — коэффициент диффузии;  $\lambda$  — приведённая длина волны  $\gamma$ -излучения.

ядерных переходов всегда  $\Gamma \ll R$ ,  $\Gamma \ll \Delta$ . Ввиду этого действующее сечение резонансного поглощения очень мало; эффект можно увеличить нек-рыми искусств. приёмами, однако и при этом он остаётся трудно наблюдаемым. В твёрдом теле благодаря взаимодействию атомов энергии отдачи превращается в энергию колебаний кристаллич. решётки (испускание и поглощение фононов). Однако процессы испускания и поглощения  $\gamma$ -квантов приобретают вероятностный характер. В среднем на один испущенный  $\gamma$ -квант кристаллу передаётся энергия, в точности равная энергии отдачи  $R$ . При этом возможны как процессы испускания и поглощения  $\gamma$ -квантов с возбуждением ( $\epsilon' < \epsilon_0$ ) и поглощением фононов ( $\epsilon' > \epsilon_0$ ), так и процесс без отдачи, т. е. М. э., когда энергия испускаемых  $\gamma$ -квантов с точностью до  $\Gamma$  равна энергии ядерного перехода (рис. 1, б). М. э. можно объяснить на классич. языке без привлечения квантовой механики. Движущееся ядро в возбуждённом состоянии можно рассматривать как излучатель с несущей частотой  $\omega_0 = \epsilon_0/h$  с затуханием

испускания наблюдаются дополнит. линии (сателлиты), отстоящие от несмещённой линии на расстояния  $\pm \Omega$ , где  $\Omega$  — целое число (рис. 2,а). Сателлиты соответствуют процессам испускания  $\gamma$ -квантов с возбуждением и поглощением УЗ-фононов.

В больших брел. молекулах или сложных хим. веществах отд. фрагменты молекул могут занимать не одно, а неск. устойчивых равновесных положений, и при достаточно высоких  $T$  происходят случайные переходы фрагмента из одного состояния в

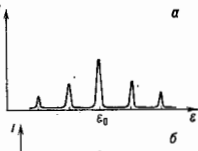


Рис. 2. Спектры испускания и поглощения  $\gamma$ -лучей в твёрдых телах при ультразвуковой начальной частоте (а) и при ограниченной диффузии (б).

другое. Т. к. движение фрагмента ограничено в пространстве, то спектры поглощения и испускания ядер, входящие в состав таких фрагментов, содержат несмещённую линию естеств. ширины. Кроме этой линии наблюдаются дополнит. линии лоренцевой формы (рис. 2,б), отражающие характер «перескокного» движения, к-рое можно рассматривать как диффузию в огранич. пространстве.

Движение ядер приводит к температурному сдвигу линии за счёт эффекта Доплера второго порядка на величину  $\Delta\epsilon = \epsilon_0 v^2/2c^2$ , где  $v$  — скорость движения излучающего или поглощающего ядра. Сдвиг очень мал ( $\Delta\epsilon/\epsilon_0 \sim 10^{-13}$ ), и только благодаря узости несмещённых линий его можно наблюдать. С увеличением темп-ры  $\Delta\epsilon$  увеличивается и энергия испускаемых и поглощаемых  $\gamma$ -квантов уменьшается. При высоких  $T$  независимо от агрегатного состояния вещества  $v^2 = 3kT/Mc^2$  и соответственно:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_0 \frac{3kT}{2Mc^2} \quad (4)$$

Эффект Доплера второго порядка проявляется себя поразному в разл. агрегатных состояниях. В газах наряду со сдвигом линии  $\Delta\epsilon$  возникает и уширение линии  $\delta\epsilon$ , сравнимое с  $\Delta\epsilon$ . В твёрдых телах  $\delta\epsilon$  намного меньше сдвига линии и практически не наблюдается.

Наблюдение М. а. возможно с помощью спектрометра, схема к-рого приведена на рис. 3. Источнику  $\gamma$ -квантов сообщается скорость  $v$  (относительно) поглотителя, при этом энергия  $\gamma$ -кванта за счёт эффекта Доплера меняется на величину  $\Delta\epsilon = \epsilon_0 v/c$ . Скорости в интервале 0,1—10 см/с приводят к смещению линии на величину  $\sim \Gamma$ . Поглотитель содержит те же ядра, что и источник, но в основном состоянии. Меняя скорость  $v$ , можно совместить или раздвинуть линии испускания и поглощения.

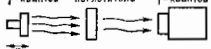


Рис. 3. Схема мёсбауэровского спектрометра.

Если линии в источнике и поглотителе сильно раздвинуты, то поглощение  $\gamma$ -квантов происходит за счёт нерезонансных процессов (в основном за счёт фотоэлектрич. поглощения атомарными электронами и эффекта Комптона). При совмещении линии общее сечение поглощения увеличивается, а число прошедших через поглотитель  $\gamma$ -квантов, регистрируемых детектором, уменьшается.

Экспериментально можно не только обнаружить резонансное поглощение, но и исследовать форму линии поглощения. На рис. 4 приведены результаты экс-

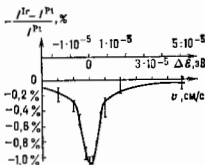


Рис. 4. Зависимость относительной разности интенсивностей  $I$   $\gamma$ -излучения, проходящего через абсорбер ( $I^0/I$ ) и платиновый ( $^{191}\text{Pt}$ ) поглотитель, от скорости  $v$  источника относительно поглотителя.

перимента Мёсбауэра, в к-ром изучалось резонансное поглощение  $\gamma$ -лучей с энергией  $\epsilon_0 = 129$  кэВ, испускаемых при переходе ядра  $^{191}\text{Ir}$  из первого возбуждённого состояния в основное (рис. 5). Источником служила пластинка металла  $^{191}\text{Os}$  (см. ниже). Источник и поглотитель  $^{191}\text{Ir}$  поддерживались при  $T = 77$  К (латиновый поглотитель использовался для измерения переаэонаэного поглощения). Наблюдаемая ширина провала отвечает ширине возбуждённого уровня  $^{191}\text{Ir}$  ( $\Gamma = 5 \cdot 10^{-9}$  эВ).

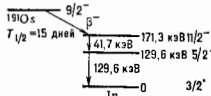


Рис. 5. Схема распада  $^{191}\text{Os}$ ; справа указаны синиги  $I$  и четность  $\pi$  состояний ( $I^\pi$ ).

Источники резонансных  $\gamma$ -квантов представляют собой обычно радиоакт. ядра с большим периодом полураспада  $T_{1/2}$ , введённые в твёрдотельную матрицу ( $T_{1/2}$  от неск. часов до неск. лет). В результате ядерных превращений ( $K$ -захвата или  $\alpha$ -распада) и последующего каскада  $\gamma$ -переходов образуется возбуждённое ядро, испускающее резонансные  $\gamma$ -кванты (рис. 5). В первом эксперименте Мёсбауэра источником служил  $\beta$ -радиоактивный  $^{191}\text{Os}$ . Ядра в возбуждённом состоянии получаются в ходе ядерных реакций (напр.,  $^{40}\text{K}$  в результате реакции  $(n, \gamma)$ ,  $^{57}\text{Fe} - (d, p)$ ) и при кулоновском возбуждении ядер ( $^{23}\text{Ge}$ ,  $^{41}\text{Ni}$ ). Удалось выделить резонансные  $\gamma$ -кванты из синхротронного излучения (с помощью дифракции  $\gamma$ -квантов на ядрах), в частности линию с энергией 14,4 кэВ, соответствующей энергии перехода ядра  $^{57}\text{Fe}$ , с монохроматичностью  $\sim 10^{-9}$  эВ, т. е. сравнимой с  $\Gamma$  переходом ядра  $^{57}\text{Fe}$ . Это открывает возможности получения мощных и узконаправленных источников резонансных  $\gamma$ -квантов.

Сечение резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов  $\sigma_{\text{рез}}$  в твёрдых телах определяется длиной волны  $\gamma$ -излучения, вероятностью М. а. ( $fM$ ), снмиами ядер в основном ( $I_0$ ) и возбуждённом ( $I_1$ ) состояниях, а также вероятностью процесса конверсии внутрjнерней

$$\sigma_{\text{рез}} = fM G_0(\epsilon); \quad (5)$$

$$G_0(\epsilon) = \frac{2I_0 + 1}{2I_0 + 1} \frac{2\pi\lambda}{1 + K} \frac{\Gamma/2 + \xi(\epsilon - \epsilon_0)}{(\epsilon - \epsilon_0)^2 + \Gamma^2/4} \quad (6)$$

Здесь  $K$  — коэф. внутренней конверсии. Величина  $K/(1 + K)$  определяет вероятность того, что поглотительный  $\gamma$ -квант ядра перейдет затем в осн. состояние, передав энергию атомарным электронам. Коэф.  $\xi$  появляется как следствие квантомеханич. эффекта — интерференции резонансного и нерезонансного (фотоэффект) процессов поглощения, имеет заметную величину лишь для переходов мультипольности Е1. Линии поглощения  $\gamma$ -квантов в переходах Е1 имеют ярко выраженную асимметрию (рис. 6). Для переходов др. мультипольности коэф.  $\xi$  пренебрежимо мал и энергетич. зависимость сечения поглощения имеет лоренцеву форму.

В твёрдом теле возможно упругое резонансное рассеяние  $\gamma$ -квантов на ядрах, при к-ром энергия рассеянных ( $\epsilon'$ ) и падающих ( $\epsilon$ )  $\gamma$ -квантов строго равна. Сечение такого процесса  $\sigma_{\text{упр}}$  пропорц. произведению ве-

роятности поглощения без отдачи ( $f_M$ ) и вероятности испускания без отдачи ( $f'_M$ ):

$$\sigma_{\text{упр}} = f_M \cdot f'_M \cdot G_0(\epsilon). \quad (7)$$

Сечение упругого нерезонансного рассеяния  $\gamma$ -квантов и рентг. лучей (напр., на атомарных электронах) пропорц. фактору Дебая — Уоллера, зависящему лишь от передаваемого твёрдому телу импульса.

Процесс упругого резонансного рассеяния происходит как бы в два этапа: резонансное поглощение и затем резонансное испускание. И тем не менее часть упруго рассеянных  $\gamma$ -квантов рассеивается когерентно, т. е. разность фаз падающей и рассеянных волн имеет строго определённое значение, зависящее от энергии падающих  $\gamma$ -квантов.

Когерентные эффекты. Воды, соответствующие когерентно рассеянным  $\gamma$ -таллическому (Тс); источник в спектрометре (рис. 3)  $^{152}\text{Os}$  в металлическом W.

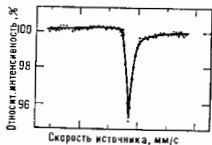


Рис. 6. Спектр поглощения металлического (Тс); источник в спектрометре (рис. 3)  $^{152}\text{Os}$  в металлическом W.

Когерентные эффекты. Воды, соответствующие когерентно рассеянным  $\gamma$ -таллическому (Тс); источник в спектрометре (рис. 3)  $^{152}\text{Os}$  в металлическом W.

При резонансной ядерной дифракции на совершенных кристаллах, содержащих высокую концентрацию резонансно рассеивающих ядер, имеет место подавление внеуругих каналов ядерной реакции. При точном выполнении условия Брэгга — Вульфа по мере увеличения амплитуды дифрагированной волны сечение резонансного поглощения уменьшается и может строго обратиться в 0. При этом полностью прекращаются все внеуругие процессы, сопровождающие резонансное поглощение (напр., процесс внутр. конверсии, внеуругое испускание  $\gamma$ -квантов), а когерентная суперпозиция из падающей и дифрагированной волн распространяется по кристаллу без поглощения. Особенность эффекта подавления состоит в том, что колебания атомов в кристалле не восстанавливают даже частично резонансного поглощения.

Анализ когерентных явлений базируется на концепции коллективного возбуждённого ядра, согласно которой невозможно указать положение возбуждённого ядра, образовавшегося после поглощения  $\gamma$ -кванта.

Лит.: Эффект Мессбауэра. Сб. ст. [Переводы], М., 1962; Каган Ю., К теории температурного красного смещения и уширения линий Мессбауэра, ЖЭТФ, 1964, т. 47, в. 1, с. 366; Давид В. С. и др., Nuclear Bragg diffraction of synchrotron radiation in yttrium iron garnet, Phys. Rev. Lett., 1968, в. 21, p. 961; Каган Ю. М., Афанасьев А. М., Войтович И. В. К., Интерференция процессов конверсии и фотоэффекта при поглощении мессбауэровского излучения, Письма в ЖЭТФ, 1969, т. 9, с. 155; Мессбауэр Р. Л., Стохастические движения атомов в металлах, Химическая физика, 1962, № 10, с. 1299; Гердла В. и др., Nuclear Bragg diffraction of synchrotron radiation in yttrium iron garnet, Phys. Rev. Lett., 1965, в. 54, p. 835; Ван Вурск У. А., Coherent effects in resonant diffraction theory, Hyperfine Interactions, 1966, в. 27, p. 289; Смирнов О. В., Coherent effects in resonant diffraction experiment, там же, p. 203.

**МЭСБАУЭРОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ** — совокупность основанных на использовании Мессбауэра эффекта методов исследования физ. и хим. свойств конденсиров. сред (гл. обр. твёрдых тел), а также исследования микроскопич. объектов (ядер, ионов, хим. и физ. комплексов) в твёрдых телах. Для М. с. харак-

терна высокая информативность. Измерения вероятности эффекта Мессбауэра и температурного сдвига резонансных линий дают сведения о среднеквадратичных смещениях и скоростях атомов, содержащих резонансное ядро. Они используются как способ исследования колебат. движений частиц в твёрдых телах и их особенностей вблизи структурных и магн. фазовых переходов. Введение атомов, содержащих резонансное ядро, в качестве примесей в твёрдое тело позволяет исследовать локальные и квазилондонские колебат. моды (см. Колбаши кристаллической решётки). Зависимость положения линии Мессбауэра от скорости движения источника  $\gamma$ -излучения относительно поглотителя (или наоборот) используются для измерения малых скоростей ( $\sim 0,1$  мм/с) макроскопич. объектов (напр., при стыковке космич. кораблей), а также спектра скоростей разл. акустич. систем в акувом и гиперзвуковом диапазоне частот.

Наиб. важные применения М. с. связаны с возможностью фиксировать сдвиги и сверхтонкие расщепления мессбауэровских линий, связанные с взаимодействием электрич. и магн. моментов ядра с внутренними электрич. и магн. полями, вызывающими расщепление ядерных уровней (см. Внутрискристаллическое поле). Для этого используется Долера эффект: источнику (или поглотителю)  $\gamma$ -лучей сообщается скорость  $v$ , при этом энергия  $\gamma$ -кванта изменяется на величину  $\Delta\epsilon = \epsilon v/c$  ( $\epsilon$  — энергия перехода). Скорости  $v \sim 0,1$ — $1$  см/с смещают линию на величину порядка её естеств. ширины (см. Ширина спектральной линии). Мессбауэровские спектрометры измеряют зависимость резонансного поглощения от  $v$  (скоростной сдвиг).

**Сверхтонкие расщепления и сдвиги**

Химический (изомерный) сдвиг мессбауэровской линии наблюдается, если источник и поглотитель химически не тождественны. Он обусловлен тем, что при переходе ядра из осн. состояния в возбуждённое несколько изменяется распределение электрич. заряда в ядре. Это приводит к изменению энергии кулоновского взаимодействия ядра с электронной оболочкой, края пропорц. произведению ср. квадрата радиуса ядерного заряда  $\langle r^2 \rangle$  (точнее, радиуса эквивалентной равномерно заряженной сферы) на плотность электронов в месте расположения ядра  $[\Psi_e(0)]^2$ , где  $\Psi_e(0)$  — волновая ф-ция  $s$ -электронов в центре атома. Если  $\langle r^2 \rangle$  для возбуждённого и осн. состояний ядра не одинаковы, то энергия  $\gamma$ -перехода будет отличаться от энергии  $\gamma$ -перехода в случае точечного ядра на величину

$$\Delta S = C \Delta \langle r^2 \rangle |\Psi_e(0)|^2,$$

где  $\Delta \langle r^2 \rangle = \langle r_0^2 \rangle - \langle r_1^2 \rangle$  — разность ср. квадратов радиусов для возбуждённого и осн. состояний ядра,  $C$  — коэф. пропорциональности. Изменение энергии  $\Delta S$  непосредственно наблюдается. Однако величина  $[\Psi_e(0)]^2$  меняется при изменении хим. связей атома, и если хим. состав или кристаллографич. модификация источника и поглотителя различны, то возникает сдвиг линий испускания и поглощения:

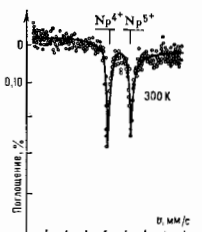
$$\delta = \delta_{\text{погл}} - \delta_{\text{ист}} = \frac{2}{5} \pi Z e^2 \left( \langle r_0^2 \rangle - \langle r_1^2 \rangle \right) \times \left[ |\Psi_e(0)|^2_{\text{погл}} - |\Psi_e(0)|^2_{\text{ист}} \right]. \quad (1)$$

Здесь  $e$  — элементарный заряд,  $Z$  — порядковый номер ядра.

Вариации  $\delta$  при изменении заряда иона в десятки и даже сотни раз (напр., для нуклидов  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ) превосходят точность измерения. Напр., разность  $\delta$  для ионов  $\text{Np}^{4+}$  и  $\text{Np}^{3+}$  составляет 32 мм/с при точности измерений  $\sim 0,1$  мм/с (рис. 1). Это даёт возможность провести тонкую градуацию хим. связей в твёр-

дых телах, установить корреляции между величинами и эдкстроотрицательностью ближайших ионов (лигандов), длинами связей лиганд — ион, а также симметрией ближайшего окружения (тетра- или окта-позиции), что широко

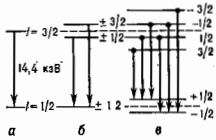
Рис. 1. Спектр испускания  $^{237}\text{Np}$  в  $^{241}\text{AmO}_2$ ; поглотитель  $^{237}\text{NpO}_2$ . Линия иона  $\text{Np}^{4+}$  соответствует равновесному зарядовому состоянию, линия  $\text{Np}^{5+}$  — неравновесному.



используется в химии и биологии. Исследование хим. сдвигов даёт сведения о плотности s-электронов на ядре.

Квадрупольное расщепление ядерных уровней и, следовательно, линий мёсбауэровского спектра вызывается взаимодействием *квадрупольного момента ядра Q* с неоднородным электрич. полем в месте расположения ядра (при некубич. симметрии окружения). На рис. 2, б приведена схема уровней ядра  $^{57}\text{Fe}$  в неод-

Рис. 2. Схема уровней  $^{57}\text{Fe}$  и переходов между ними: а — без расщепления; б — квадратное расщепление уровней в неоднородном электрич. поле; в — расщепление в неоднородном магнитном поле; I — спин ядра.



родном электрич. поле, на рис. 3 — скоростной спектр резонансного поглощения для источника с не-

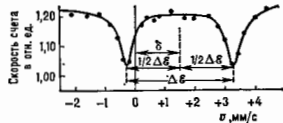


Рис. 3. Скоростной спектр резонансного поглощения для нерасщеплённых линий  $^{57}\text{Fe}$  (поглотитель  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ );  $\Delta E$  — квадратное расщепление возбуждённых уровней  $^{57}\text{Fe}$ ;  $\Delta E_h$  — квадратное расщепление возбуждённых уровней  $^{57}\text{Fe}$ ;  $\Delta E_h$  — изомерный сдвиг. Источник при температуре  $T = 300\text{K}$ , поглотитель при  $T = 14\text{K}$ .

расщеплённой линии испускания  $\delta = 14,4$  кэВ. Расстояние между расщеплёнными линиями

$$\Delta\delta = \frac{1}{2} e q Q \left( 1 + \frac{\eta^2}{3} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $q$  — градиент,  $\eta$  — параметр асимметрии.

При монокристаллах, поглотителе интенсивность компонент квадратного расщепления по-разному зависит от угла между направлением  $z$ -кванта и осью кристалла — квадратный дублет становится асимметричным. Асимметрию квадратного дублета можно наблюдать и в поликристаллах, образцах, если вероятность эффекта Мёсбауэра анизотропна (э-эффект Гольдманского — Кэригана).

Неоднородное электрич. поле на ядре создаётся электрич. зарядами ионов ближайшего окружения. Однако за счёт поляризации собств. электронной оболочки иона, содержащего резонансное ядро, градиент электрич. поля может уменьшиться в десятки и даже сотни раз, а в большинстве случаев даже изменить знак.

Фактор, определяющий это изменение, наз. антиэкранирующим (фактор Штаркхаймера). Степень антиэкранировки зависит от хим. состояния иона; наблюдается большой разброс величин квадратного расщепления  $\Delta\delta$  даже для соединений с одинаковым распределением зарядов ближайшего окружения. Изучение квадратных расщеплений даёт дополнит. сведения о природе хим. связей и используется в химии и биологии.

Измерение спектров квадратного расщепления даёт также сведения о структуре и электронных свойствах твёрдого тела (матрицы). Напр., в спектре поглощения ядер  $^{57}\text{Fe}$  высокотемпературного сверхпроводника  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{Fe}_{0.2}\text{O}_8$  (температура сверхпроводящего перехода  $72\text{K}$ ) наблюдаются 3 квадратных дублета, соответствующих ионам Fe, замещающим ионы Cu в структурных позициях с разл. кислородным окружением (рис. 4). Хим. сдвиги для трёх позиций Fe

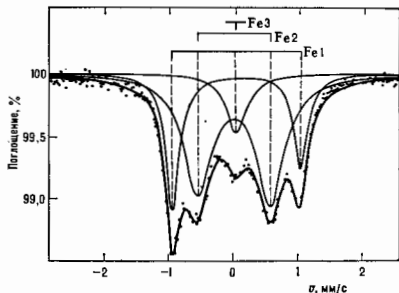


Рис. 4. Спектр поглощения нерасщеплённых линий  $^{57}\text{Fe}$  при  $T = 295\text{K}$  в высокотемпературном сверхпроводнике  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{Fe}_{0.2}\text{O}_8$  — результат суперпозиции парциальных спектров поглощения ионов Fe, занимающих различные неэквивалентные позиции в кристаллической решётке: Fe1, Fe2, Fe3.

одинаковы и близки к сдвигу в металлы. железе, т. е. плотность s-электронов прил. одинакова на всех узлах решётки. Это свидетельствует о том, что валентные электроны для данного сверхпроводника делокализованы по всему кристаллу. Асимметрия дублета Fe2, обусловленная разной вероятностью эффекта Мёсбауэра, свидетельствует об анизотропии тепловых колебаний атомов Fe, замещающих ионы Cu в недостающих октаэдрич. позициях. Суммарные площади под отд. дублетами определяют «заселённости» разл. позиций ионами Fe.

Магнитное сверхтонкое расщепление ядерных уровней и мёсбауэровских линий вызывается взаимодействием магн. момента ядра и магн. поля в месте расположения ядра. Энергия магн. сверхтонкого взаимодействия пропорц. произведению ядерного магн. момента и на локальное магн. поле, к-рое наз. сверхтонким магн. полем  $H_{CT}$ . Это взаимодействие расщепляет ядерное состояние на  $2I + 1$  земановских подуровней, расстояние между к-рыми равно  $\mu H_{CT} I$  ( $I$  — спин ядра). Число компонент сверхтонкой структуры в мёсбауэровском спектре равно числу  $z$ -переходов между земановскими подуровнями возбуждённого и осв. состояний ядра, разрешённых правилом отбора по магнитному квантовому числу. Напр., для магн. дипольного  $z$ -перехода между состояниями с  $I = 3/2$  и  $I = 1/2$  в мёсбауэровском спектре  $^{57}\text{Fe}$  наблюдаются 6 компонент магн. сверхтонкой структуры (рис. 5).

На ядрах атомов редкоземельных элементов ( $^{61}\text{Dy}$ ,  $^{169}\text{Tm}$ ,  $^{167}\text{Er}$ ) локальные магн. поля достигают велич-

ны  $\sim 10^9 - 10^7$  Э. Такие большие магн. поля возникают за счёт диполь-дипольного взаимодействия магн. момента ядра с магн. моментом электронной оболочки иона, содержащего резонансное ядро (магн. сверхтонкое взаимодействие обуславливает сверхтонкую струк-

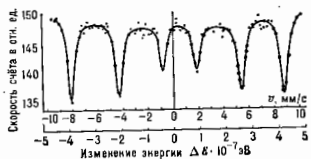


Рис. 5. Спектр резонансного поглощения вересщённой линии 14,4 нэВ  $^{57}\text{Fe}$  в металлическом железе, обусловленный внутренним магнитным полем, действующим на ядро  $^{57}\text{Fe}$  в металле ( $\Delta E \sim 10^{-12}$  эВ).

туру оптич. спектров). Вклад в сверхтонкое взаимодействие от s-электронов определяется спиновой плотностью s-электронов в центре атома:

$$H_{ст} = \frac{8\pi}{3} \mu_B [|\psi_s(0)|^2 - |\psi_{s'}(0)|^2]. \quad (3)$$

Здесь  $|\psi_s|^2$  и  $|\psi_{s'}|^2$  — плотности s-электронов в месте расположения ядра с направлениями спинов вдоль и против магн. момента  $\mu$  ядра,  $\mu_B$  — магнетон Бора. Часть сверхтонкого взаимодействия, обусловленная полем  $H_{ст}^3$ , наз. контактным взаимодействием Ферми.

В формировании магн. поля на ядре существенную роль играют электроны внеш. оболочек атома с нескомпенсиров. спинами. Однако электроны внутр. оболочек атома, поляризуясь под действием внеш. оболочек, создают на ядро дополнил. магн. поле, к-рое может во много раз превышать поле, создаваемое внеш. электронами, и иметь др. знак. Напр., в металлич. железе сверхтонкое магн. поле  $H_{ст}$  направлено противоположно направлению намагниченности железа. Для редкоземельных ионов осн. вклад в сверхтонкое магн. поле вносят электроны недоразобной f-оболочки.

Магн. сверхтонкое расщепление линий мёсбауэровских спектров даёт информацию об  $H_{ст}$ , т. е. о магн. свойствах вещества ( $\mu$  для большинства ядер известны). С помощью М. с. можно исследовать температурную зависимость намагниченности ферромагнетиков и определить (при отсутствии внеш. поля) температуру Кюри (появление и исчезновение сверхтонкой структуры). Для др. магнитоупорядоченных веществ (ферриты, антиферромагнетики) можно восстанавливать температурные зависимости для отд. магн. подрешёток и исследовать магнитные фазовые периоды. М. с. используется также для исследования спиновых стёкол. По возникновению магн. сверхтонкой структуры можно фиксировать образование магн. упорядочения в сверхпроводящих материалах, что особенно важно для понимания механизма высокотемпературной сверхпроводимости.

На рис. 6 приведены мёсбауэровские спектры  $^{57}\text{Fe}$  в высокотемпературных сверхпроводниках  $\text{YBaCu}_2-x\text{Fe}_x\text{O}_6$  (а). Спектр образца с  $x = 0,1$  при  $T = 295$  К состоит из двух квадрупольных дублетов и синглета, отвечающих атомам Fe в трех кристаллографич. позициях структуры. Большие величины квадрупольного расщепления указывают на сильное искажение локальной симметрии электр. поля. При понижении темп-ры до  $T = 4,2$  К и увеличении концентрации Fe до  $x = 0,2$  в спектре появляется (б) магн. сверхтонкое расщепление, свидетельствующее о магн. упорядочении атомов Fe в «медной подре-

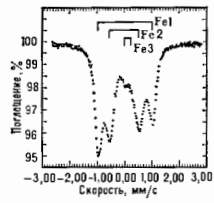
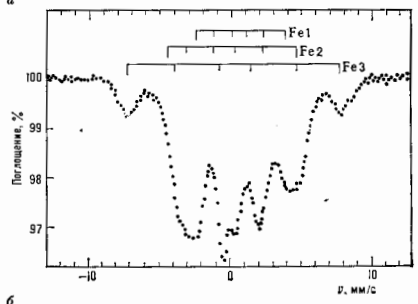


Рис. 6. Магнитное расщепление линий  $^{57}\text{Fe}$  в спектре поглощения  $\text{YBaCu}_2-x\text{Fe}_x\text{O}_6$  при обычной температуре (а) и дополнительного расщепления при  $T = 4,2$  К (б); Fe1, Fe2, Fe3 соответствуют различным позициям атомов  $^{57}\text{Fe}$  (рис. 4).



шётке». Т. о., наблюдается эффект сосуществования сверхтонкости и магн. упорядочения. Сверхтонкая структура (СТС) линии мёсбауэровского спектра в парамагнетиках имеет более сложный характер. Её формирование определяется большим числом факторов, таких, как спин (или суммарный момент) электронной оболочки атома, содержащего резонансное ядро, симметрия внутрикристаллич. поля, под действием к-рого осн. состояние парамагн. иона расщепляется на ряд дублетно вырожденных (если спин иона лодуцельный) подуровней (к р а м е р с о в ы д у б л е т ы, см. *Электронный парамагнитный резонанс*). На формирование СТС влияют также наличие слабых магн. лозей и скорость релаксации спина электронной оболочки (спин-спиновой и спин-решёточный). Для отд. крамеровского дублета сверхтонкое магн. взаимодействие анизотропно (возможны разл. соотношения между компонентами тензора сверхтонкого взаимодействия). Перечисленное обуславливает разнообразие спектров СТС в парамагнетиках.

На рис. 7 приведен спектр примесных ионов  $^{57}\text{Fe}$  в нитрате алюминия, представляющий собой сложение

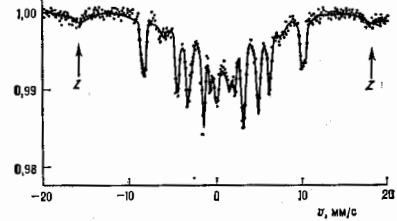


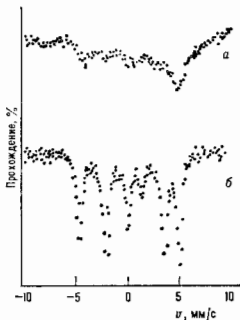
Рис. 7. Мёсбауэровский спектр  $^{57}\text{Fe}$  в монокристалле  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  при  $T = 4,2$  К в поле  $H = 110$  Э.

спектров от трёх Kramerovских дублетов, на к-рые расщепляется осн. состояние иона  $Fe^{3+}$ . На образец под определённым углом к кристаллографич. осям накладывается слабое магн. поле, под действием к-рого происходит перемешивание электронных и ядерных состояний, в результате чего разрешены переходы, в к-рых меняется не только энергия магн. сверхтонкого взаимодействия, но и энергия взаимодействия электронной оболочки иона с вешн. магн. полем и в спектре наблюдаются дополнительные Z-линии.

В ряде случаев чувствительность спектров СТС к слабым магн. полям велика. Несмотря на то что на ядра со стороны электронной оболочки действуют магн. поля порядка  $10^8$  Э, наличие слабого вешн. магн. поля (1—10 Э) может кардинально изменить СТС. Напр., за счёт слабых магн. полей от магн. примесей и соседних ядерных магн. моментов ( $\sim 10$  Э) спектр размывается (рис. 8, а), а вешн. поле  $\sim 200$  Э приводит к появлению чёткой сверхтонкой структуры с узкими линиями (рис. 8, б).

За счёт процессов спин-спиновой и спи-решёточной релаксации электронной системы направление магн. сверхтонкого поля  $H_{СТ}$  в ядре изменяется во времени.

Рис. 8. Спектр поглощения монохроматизированного метиоглобина при  $T = 4,2$  К без внешнего магнитного поля (а) и в поле  $H = 200$  Э (б).



В результате в мёсбауэровских спектрах СТС наблюдается уширение отд. линий и уменьшение расстояний между ними как результат частичного усреднения  $H_{СТ}$ . Для малых времён релаксации  $\tau \ll \tau_d$  ( $\tau_d$  — период ларморовой прецессии ядерного спина в поле  $H_{СТ}$ ) магн. часть СТС полностью усредняется, и в мёсбауэровских спектрах наблюдаются только квадрупольное расщепление. Такая релаксация, трансформация спектров наблюдается и в магнитоупорядоченных образцах в виде порошков из микрокластич. достаточно малых размеров (суперпарамагнетизм), и в магнитных жидкостях. М. с. используется для изучения релаксационных процессов в таких системах.

#### Экспериментальные методы

Конверсионная М. с. Резонансное поглощение  $\gamma$ -квантов можно фиксировать не только по ослаблению интенсивности проходящего через образец  $\gamma$ -излучения (а б с о р б ц и о н а в я М. с.), но и по изменению интенсивности вылетающих из образца конверсионных электронов (конверсионная М. с., см. Конверсия ионизирующей). В конверсионной М. с. достигается более высокое отношение сигнала к шуму, т. к. исследуется не весь образец, а только его небольшой приповерхностный слой, толщина к-рого сравнима с глубиной выхода конверсионных электронов из образца. Конверсионные электроны и их энергетич. спектр регистрируются пропорциональными счётчиками, магн. и др. бета-спектрометрами. Это позволяет выделять электроны разл. энергий и тем самым фиксировать процессы резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов на разл. глубинах образца. Такая селективная по глубине конверсионная М. с. даёт возможность исследовать слои толщиной от в.ск. нм до долей мкм. С помощью селективной по глубине М. с. изучаются тончайшие магн.

слои, процессы коррозии, катализа и др. поверхностные явления.

Измерения интенсивности характеристич. рентгеновского излучения, возникающего в ходе резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов вслед за процессом внутр. конверсии, позволяют исследовать хим. состав поверхностных слоёв порядка в.ск. десятков нкм.

Эмиссионная М. с. В эмиссионной М. с. объектом исследования являются вещества, в к-рые введены радиоакт. ядра, образующие в результате ядерных превращений и последующего каскада  $\gamma$ -переходов возбуждённое ядро, испускающее резонансные  $\gamma$ -кванты (рис. 9). Анализ энергетич. спектра испускаемых  $\gamma$ -квантов проводится с помощью мёсбауэровского спектрометра, в к-ром поглотитель содержит резонансные ядра в осн. состоянии и имеющие единичную линию поглощения (либо с помощью детектора конверсионных электронов).

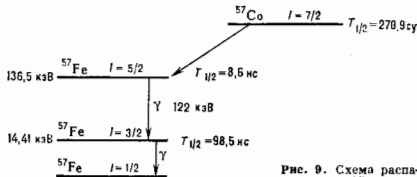


Рис. 9. Схема распада  $^{57}Co$ .

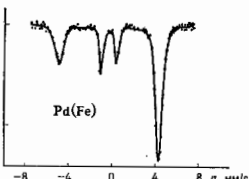
Эмиссионная М. с. расширяет класс исследуемых объектов и физ. явлений. Метод обладает высокой чувствительностью. Можно исследовать образцы с чрезвычайно малой концентрацией радиоакт. ядер (порядка  $10^{-8}\%$ ). В процессе ядерных превращений и каскада  $\gamma$ -переходов электронная оболочка иона или его электронное окружение оказываются в неравновесном зарядовом состоянии. Если время жизни неравновесного состояния меньше времени жизни возбуждённого состояния ядра, то в спектрах испускания наблюдаются дополнит. линии с хим. сдвигом и квадрупольным сплитингом, соответствующими неравновесному зарядовому состоянию.

В эмиссионной М. с. можно производить дифференцированные по времени измерения мёсбауэровских спектров. Регистрируя один из  $\gamma$ -квантов (напр.,  $\gamma$ -квант с энергией 122 кэВ в распаде ядра  $^{57}Co$ , рис. 9), можно зафиксировать момент образования возбуждённого состояния ядра, испускающего резонансные  $\gamma$ -кванты, а затем при помощи совпадений слемы с временной задержкой измерить спектры испускания в заданный момент времени относительно момента образования возбуждённого состояния. Таким методом обнаруживаются неравновесные зарядовые состояния ионов с временами жизни, значительно меньшими, и можно проследить кинетику распада этих состояний.

Эмиссионная М. с. — уникальный инструмент исследования радиац. повреждений. Материнское ядро является источником разл. рода ядерных излучений, вызывающих локальные нарушения структуры. Образующееся в ходе ядерных превращений возбуждённое резонансное ядро является датчиком, фиксирующим наличие радиац. повреждений и кинетику их распада (см. Радиационные дефекты).

При сверхкритич. темп-рах, когда все релаксационные процессы замедлены, неравновесной может оказаться заселённость магн. подуровней возбуждённого состояния ядра и эмиссионные спектры магн. СТС становятся асимметричными. В качестве примера на рис. 10 представлены спектры испускания  $\gamma$ -квантов (с энергией 14,4 кэВ) ядрами  $^{57}Fe$ , образующимися при распаде

Рис. 10. Спектр испускания  $\gamma$ -квантов с  $E = 14,4$  эВ ядер  $^{57}\text{Fe}$ , образующихся при распаде  $^{57}\text{Co}$ , внедрённого в Pd (концентрация  $\sim 10^{-4}\%$ ), при  $T = 0,825$  К в поле  $H = -500$  Э, параллельном направлению  $\gamma$ -квантов.



ядер  $^{57}\text{Co}$  (рис. 9), внедрённых в Pd. Спины ядер  $^{57}\text{Co}$  поляризуются во внеш. поле, и частично ядерная спиновая поляризация persists в ходе распада ядра  $^{57}\text{Co}$  возбуждённого состояния ядра  $^{57}\text{Fe}$ . За счёт поляризации ядер (см. *Ориентированные ядра*) интенсивности крайних линий спектра оказываются неодинаковыми. По разности их интенсивностей определяется величина сверхтонкого магн. поля  $H_{\text{ст}}$  на ядрах  $^{57}\text{Co}$ . По расстоянию между крайними линиями находится  $H_{\text{ст}}$  на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ .

Другие методы. Резонансное рассеяние  $\gamma$ -квантов с последующим анализом энергетик. спектра рассеянных  $\gamma$ -квантов позволяет исследовать релаксационные процессы в электронной спиновой системе с характерными временами порядка времени жизни возбуждённого состояния ядра.

Резонансные  $\gamma$ -кванты можно использовать как источник при исследовании нерезонансного резлеевского рассеяния на электронах (резлеевского рассеяния мёссбауэровского излучения, РРМИ) вместо обычного применяемого источника рентг. квантов. Высокие энергии, разрешение позволяет выделить упругую компоненту в рассеянном излучении и тем самым осуществлять прецизионный структурный анализ вещества. Это особенно важно вблизи темп-ры плавления, в окрестностях точек фазового перехода, а также для *ионных сверхпроводников*. Наличие НЧ-колебл. и вращат. мод или диффузии либо наличие конформацион. подвижности (изменения структуры) в биол. соединениях вызывает неупругое рассеяние, к-рое невозможно отделить от упругого в обычном методе *рентгеновского структурного анализа*. Метод РРМИ не требует присутствия в исследуемом веществе резонансного ядра и поэтому может быть использован для более широкого класса веществ, чем методы обычной М. с.

Заключение. М. с. позволяет в одном эксперименте определить вероятности эффекта Мёссбауэра, величину температурного смещения, хим. сдвига, квадрупольного и магн. расщеплений, формы линий отд. компонент. Это сочетается с возможностью влиять на мёссбауэровские спектры с помощью внеш. воздействий (темп-ры, давления, магн. и электр. полей, ультразвука и радиочастотного излучения). Всё это, а также доступность большого числа резонансных нуклидов и возможность выбором экстрим. методики исследовать объекты размерами от одного монолота до массивного образца делают М. с. уникальным методом анализа физ. и хим. свойств твёрдых тел.

Наряду с применением М. с. в физике твёрдых тел, в ядерной физике, химии, биологии, физике и химии поверхности М. с. также используются в геологии (разведка и экспресс-анализ руд, определение фазового состава метеоритов и образцов лунного грунта), металлофизике (упрочнение и старение сплавов), машиностроении, медицине (напр., для измерения глазо-орбитального пульса), технике (измерения скоростей и вибрации), археологии (установление состава керамики, красок и их старения).

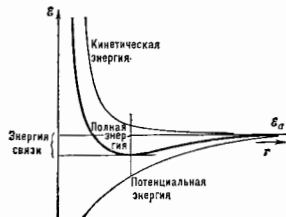
Лит.: Шпиль в ель В. С., Резонанс гамма-лучей в кристаллах, М., 1969; Суздалев А. П., Динамические эффекты в гамма-резонансной спектроскопии, М., 1979; Fitch J. M., Mössbauer spectroscopy in actinide research, «Radiochimica Acta», 1983, v. 32, p. 105; Коэн Р. В., Ядерно-резонансные эксперимен-

ты с использованном источникои синхротронного излучения, в кн.: Мёссбауэровская спектроскопия, пер. с англ., М., 1983; Золотоя Е. В., Иоли И. Е. М., Когерентное резлеевское рассеяние мёссбауэровского излучения, Рига, 1986; Вайко В., Investigation of electronic relaxation in a classic magnet by selective-excitation double-Mössbauer techniques. Theory and experiment, «Phys. Rev. B», 1986, v. 33, № 11, p. 7421. А. М. Афанасьев.

**МЕТАГАЛАКТИКА** — совокупность галактик и мегалактик. среды. Ныне наблюдениями доступна часть М., содержащая искр. млрд. галактик (см. *Всеяенная*).

**МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ** — равновидность гомополярной хим. связи, реализующаяся в металлах и сплавах. При сближении атомов и образовании кристаллов металлов и сплавов волновые ф-ции валентных электронов перекрываются. Поэтому представление о локализации внеш. электронов вблизи атома теряет смысл. Это соответствует классич. представлению о наличии в металлах «газа» свободных электронов (см. *Другие теории металлов*). Отрицательно заряженный электронный газ удерживает положительно заряженные ионы металла на определённых расстояниях друг от друга.

В действительности М. с. имеет более сложную природу, и методы её расчёта основаны на *зонной теории* твёрдого тела. В наиб. простом варианте характер М. с. определяется двумя факторами. С одной стороны, при сближении металлыч. атомов волновые ф-ции электронов перекрываются и электрон имеет возможность перемещаться в более широкой области пространства (чем в изолированном атоме), где он имеет более низкую потенциальную энергию. С др. стороны, при сжатии электронного газа возрастает энергия Ферми  $E_F$ , а с ней ср. кинетич. энергия электронов  $E_k$ . Равновесная плотность электронов соответствует минимуму полной энергии. Расстояние между ионами, при к-ром это условие реализуется, можно считать атомным радиусом металла (рис.).



Чистая ненаправленная М. с. наблюдается у одновалентных металлов (Na, Li и др.), обладающих кубическими плотно упакованными структурами. В случае металлов с искр. электронами на внеш. оболочке характер взаимодействия усложняется, поскольку не все электроны делокализуются. Поэтому определённую составляющую в связь вносит ковалентное взаимодействие (см. *Ковалентная связь*). Эти металлы имеют кубическую объёмно-центриров. структуру или гексагональную плотную упаковку атомов.

М. с. определяет электр. и тепловые свойства металлов, обуславливая высокие электр. и теплопроводности. Характер М. с. сказывается и на механич. свойствах металлов. Металлы — наиб. пластичные кристаллы, т. к. в них возможно свободное перемещение дислокаций:  $E_F$  уменьшается, если расстояние между ионами растёт. Соответственно энергия связи зависит гл. обр. от плотности упаковок атомов и система легко приспособляется к локальным отклонениям от строгой регулярности решётки.

Лит.: Займан Д. Ж., Принципы теории твёрдого тела, пер. с англ., М., 1974; см. также лит. при Ст. *Металлы*.



**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЗВЕЗДЫ** (Ам-звезды) — подгруппа *лижских пекларных звезд* верхней части главной последовательности Герцишпрунга — Рассела диаграммы. М. з. расположены в области *спектральных классов* F5 — A5, однако границы несколько размыты. Привязано по к-рому классифицируются М. з., — уменьшенное содержание в их атмосферах Са и (или) Sc и (или) увеличенное содержание элементов группы железа. Спектральные исследования показывают, что в подавляющем большинстве случаев М. з. являются членами двойных звездных систем.

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СТЕКЛА** (метглассы) — разновидность *аморфных металлов*, аморфные сплавы с металлами. типом проводимости, к-рые не имеют дальнего порядка в пространстве, расположения атомов и характеризуются макроскопич. коэф. сдвиговой вязкости  $\eta \approx 10^{14} - 10^{15}$  Па. Их изготавливают в виде плёнок, лент и проводов с помощью спец. техн. приёмов (закалка из расплава при типичных скоростях охлаждения  $\sim 10^6$  К/с, термич. папыление или катодное распыление в вакууме на охлаждаемую подложку и т. д.), к-рые ведут к быстрому затвердеванию сплавляемых компонентов в относительно узком температурном интервале около т. в. температуры стеклования  $T_g$ .

М. с. обладают уникальным сочетанием высоких механич., магн., электр. и коррозионных свойств [1—8].

М. с. исключительно тверды и обладают высокой прочностью на растяжение; напр., предел текучести  $\sigma_y$  для М. с. Fe<sub>20</sub>B<sub>20</sub> достигает  $3,6 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup> (370 кгс/мм<sup>2</sup>) [5], что намного превосходит значение  $\sigma_y$  лучших сталей; по этой причине М. с. применяют для армировки в композиц. материалах (композитах).

По магн. свойствам М. с. подразделяют на два технологически важных класса. М. с. класса «ферромагнитный переходный металл» (Fe, Co, Ni, в количестве 75—85%) — металл (В, С, Si, P—15—25%) являются *магнитно-мягкими материалами* с незначительной *коэрцитивной силой*  $H_c$  ввиду отсутствия магн.-кристаллич. анизотропии (наблюдаемая макроскопич. *магнитная анизотропия* обусловлена при ненулевой магнитострикции внутр. или внешне. напряжениями, к-рые могут быть сняжены при отжиге, а также наведенной анизотропией в расположении пар соседних атомов). *Магнитная атомная структура* осп. состоянии таких систем может быть представлена в виде совокупности параллельно ориентированных локализованных магн. моментов при отсутствии трансляц. периодичности в их пространстве, размещении, причём благодаря эффектам локального окружения магн. моменты ионов по своей величине могут флуктуировать (см. *Аморфные магнетики*). М. с. этого класса имеют почти прямоугольную петлю *гистерезиса магнитного* с высоким значением индукции насыщения  $B_s$ , что в сочетании с высоким уд. электр. сопротивлением  $\rho$ , следовательно, низкими потерями на вихревые токи делает М. с. по сравнению с электротехн. сталями более предпочтительными при применении, напр., в трансформаторах [6].

Сравнительные характеристики нек-рых кристаллич. и зарубежных аморфных магнитно-мягких сплавов [2] (а также одного из отечеств. М. с. 94 ЖРСР — А на основе железа [8]) приведены в табл. 9а.

М. с. класса *среднеземельный элемент — переходный d-металл*, обычно прототипизируемые в виде плёнок с помощью катодного распыления, в ряде случаев (Gd — Co, Gd — Fe) обнаруживают коллинеарную ферромагн. структуру со свойствами, перспективными для создания устройств с памятью на *цилиндрических магнитных доменах* (ЦМД), напр. низкой намагниченности насыщения  $M_s$  и высокой анизотропией, перпендикулярной плоскости плёнки [3]. В большинстве др. случаев сильная локальная одноионная анизотропия со случайным распределением осей лёгкого намагничивания, присущая редкоземельным ионам с ненулевым орбитальным

Сравнительные характеристики некоторых магнитно-мягких кристаллических и аморфных сплавов (при 300 К)

	Состав (в %), марка	$T_g$ , °C		$H_c$ , А/м	$\rho$ , Ом·см
		В, Тл	Т, °C		
Кристаллические сплавы	80 Ni, 16 Fe, 4 Mo, молибденистый ферромагн.	0,78	460	1,99	55
	80 Ni, 20 Fe, супермагнал	0,82	400	0,46	65
	50 Ni, 50 Fe, дельтамагл	1,60	480	7,96	45
	96,8 Fe, 3,2 Si, трансформаторная сталь текстурованная	2,03	730	39,80	50
Аморфные сплавы	Fe <sub>80</sub> Co <sub>10</sub> Si <sub>10</sub> B <sub>10</sub>	0,67	430	0,80	134
	Fe <sub>80</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>10</sub> B <sub>10</sub> , метгласс**—2826	0,82	247	1,59	180
	Fe <sub>80</sub> Ni <sub>10</sub> C <sub>10</sub> B <sub>10</sub> , метгласс—2615	1,49	292	3,98	150
	Fe <sub>80</sub> Ni <sub>10</sub> B <sub>10</sub> , метгласс—2605	1,60	374	3,18	140
	94 ЖРСР — А	1,60	370	4,70	125

\*  $T_g$  — температура перехода в парамагнитное состояние (Кюри точка).

\*\* Metglass — зарегистрированная торговая марка корпорации Allied Chemical Corporation.

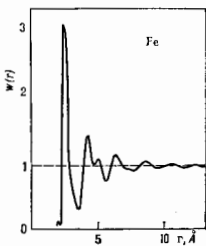
моментом, обычно приводит в М. с. этого класса к хаотич. неколлинеарной структуре типа *случайного стекла*.

Из электр. свойств М. с. наиб. существенны большая величина остаточного магнитного сопротивления (обычно в 2—4 раза больше, чем у кристаллич. аналогов) и малое значение температурного коэф. сопротивления  $(1/\rho)(d\rho/dT) = 10^{-4} - 10^{-3}$  К<sup>-1</sup> (вне температурного интервала протекания процессов структурной релаксации и кристаллизации).

Ряд М. с. класса «переходный металл — неметалл» с добавками Сг и Р обнуляет исключит. коррозионную стойкость в агрессивных средах, превышающую на неск. порядков стойкость нержавеющей сталей [3,7]. Неупорядоченность атомной структуры М. с. является также причиной высокой стойкости их свойств к воздействию радиации.

Аморфная структура М. с., являясь метастабильной, обладает очень большим временем жизни. Напр., оценки временного интервала эксплуатации, определяемого началом процесса кристаллизации, дают для одного из наименее стабильных М. с. Fe<sub>20</sub>B<sub>20</sub> ок. 550 лет при 175 °С и 25 лет при 200 °С [2].

Своеобразие физ. свойств М. с. является следствием аморфности их структуры (её хим. гомогенности, отсутствия межконтурных границ и линейных дефектов типа *дислокаций*). На рентгено-, электро- и нейтронграммах М. с. имеется неск. диффузных гало, к-рые описываются с помощью функции радиального распределения атомов (ФРРА)  $4\pi r^2 \rho(r)$ , где  $\rho(r)$  — усреднённая атомная плотность на расстоянии  $r$  от случайного, выбранного за начало отсчёта атома (рис.). ФРРА не даёт полной информации о расположении атомов в трёхмерном пространстве, однако в сочетании с др. методами (исследованием тонкой структуры рентг. спектров поглощения, ангиивидией позитронов и т. д.) она даёт возможность отобразить те структурные модели М. с.,



Нормированная функция радиального распределения атомов  $W(r) = 4\pi r^2 \rho(r) / 4\pi r^2 \rho_0$  ( $\rho_0$  — средняя атомная плотность вещества) для аморфного железа [8].

к-рые лучше всего соответствуют эксперим. данным. Сходство ФРРА для аморфного и жидкого состояний, особенно на больших и ср. расстояниях, позволило на первых порах использовать для одноатомных М. с. модель случайной плотной упаковки твёрдых сфер, в своё время предложенную Дж. Д. Берналом (J. D. Bernal) для

одноатомных жидкостей, а для М. с. типа «металл — неметалл» — модификацией этой модели [10], согласно которой небольшие атомы неметалла заполняют большие пустоты («дырки» Вернала) в случайной плотной упаковке атомов металла и не соседствуют друг с другом. Однако данные дифракц. экспериментов (напр., расширение второго пика ФРРА, отсутствующее в жидких металлах) говорят о существовании в М. с. ближнего атомного порядка. Расчёты термодинамич. устойчивости атомных микрокластеров и структурного фактора для М. с. указывают на предельность для них модели ближнего порядка [11], в к-рой осн. элементом структуры является икосаэдр — правильный двадцатигранник, получаемый упаковкой 12 слегка искажённых тетраэдров и обладающий 12 вершинами с 5 сходящимися ребрами, через к-рые можно провести 6 осей симметрии пятого порядка.

Хотя икосаэдрич. кластер не может быть элементом построения кристалла, поскольку невозможно плотно заполнить трёхмерное пространство путём периодич. трансляций икосаэдра без появления несогласованности в структуре, веским аргументом в пользу икосаэдрич. ближнего порядка в М. с. является также недавнее открытие в сплаве  $Al_{13}Mn_{14}$  [12] принципиально нового типа атомич. структуры твёрдых тел — квазикристаллич. структуры с икосаэдрич. дальним порядком (см. *Квазикристаллы*). Подобно М. с., квазикристаллы получают быстрой закалкой из расплава (напр., для определённых составов в системах  $Al - Mn$ ,  $Ni - V - Ti$ ,  $Al - Mg - Zn$ ,  $Al - Mg - Cu$ ,  $Fe - Ti$ ,  $Al - Fe$ ), но, в отличие от М. с., дают на рентгенограммах когерентные брэгговские рефлексы, соответствующие симметрии пятого или даже десятого порядка [13, 14]. Нек-рые М. с. (напр.,  $Pd_{40}Co_{20}Si_{20}$  [15]) после отжига переходят в квазикристаллич. состояние, обнаруживая тем самым тесную генетич. связь структурного состояния М. с. и квазикристаллич. состояния.

Лит.: 1) В. В. Зинченко и А. А. Амелин, *УФН*, 1981, т. 134, с. 305; 2) Л. В. Бонч-Бруевич и Ф. Е. Переплеткин, *Магнетизм аморфных сплавов в магнитных устройствах*, в кн.: *Магнетизм аморфных систем*, пер. с англ., М., 1981; 3) Э. В. Др. и Х. Б. Хантингтон, *Аморфные ферро- и ферромагнитные пер. с метал.*, М., 1982; 4) Крайтон и В. С. Ли-венчик и Я. И. Л., *Физические свойства металлов и сплавов в аморфном состоянии*, в кн.: *Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка*, т. 18, М., 1982; 5) *Металлические стекла*, пер. с англ., М., 1984; 6) *Amorphous metallic alloys*, ed. by F. Lubovsky, L. - Ia. o. I., 1983; 7) *Аморфные сплавы*, М., 1984; 8) *Преображенский А. А., Бишарп Е. Р.*, *Магнитные материалы и элементы*, 3 изд., М., 1986; 9) *Исследования Т. Electron diffraction study of the local atomic arrangement in amorphous iron and nickel films*, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1973, v. 19, № 2, p. 707; 10) *Poik D. E.*, *The structure of glassy metallic alloys*, *Acta Metall.*, 1972, v. 20, № 4, p. 485; 11) *Scherv S. K. and D. R.*, *Order in metallic glasses and icosahedral crystals*, *Phys. Rev. B*, 1985, v. 32, № 7, p. 4592; 12) *Schertan D. и др.*, *Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry*, *Rev. Lett.*, 1984, v. 52, p. 1310; 13) *Steinhardt P. J.*, *Quasicrystals. I. 2*, *Phys. Rev. B*, 1986, v. 34, № 2, p. 598; 14) *Нельсон Д. Р.*, *Квазикристаллы*, пер. с англ., «Мир науки», 1986, № 10, с. 19; 15) *Poik D. E.*, *Structure of the Pd-Co-Si alloy with icosahedral phase transformation in Pd-U-Si alloys*, *Phys. Rev. Lett.*, 1985, v. 55, № 21, p. 2324. М. В. Медведев.

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ВОДОРОД** — совокупность фаз высокого давления водорода, обладающих металлич. свойствами. Возможность перехода водорода в металлич. фазу была выявлена теоретически рассмотрена Ю. Вигнером и Х. Б. Хантингтоном в 1935 [1]. В дальнейшем по мере развития методов электронной теории металлов ур-ные состояния металлич. фаз водорода исследовалось теоретически. На рис. 1 приведена фазовая диаграмма, полученная путём синтеза результатов этих расчётов с эксперим. и теоретич. данными по ур-нич. состоянию молекулярного водорода [2]. При атм. давлении и низких темп-рах водород существует в виде диэлектрич. молекулярного кристалла, при повышении давления происходит переход в кристаллич. металлич. состояние. При этом в зависимости от темп-ры возможны 3 фазы М. в. При темп-ре  $T = 0$  К и давлении  $p = 300 - 100$  ГПа металлизация

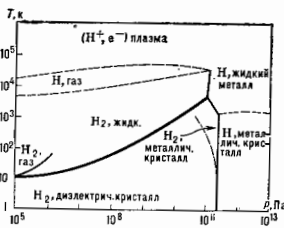


Рис. 1. Диаграмма состояния водорода.

сопровождается перестройкой кристаллич. структуры, диссоциацией молекул  $H_2$  и металлич. кристалл становится атомарным [3]. При  $T > 10$  К возможна металлизация с сохранением структуры молекулярного кристалла (пунктир); металлизация такого типа ранее наблюдалась в воде. При дальнейшем повышении давления или темп-ры наступает плавление металлич. фазы и образуется жидкий атомарный М. в.

Водород в металлич. фазе содержится в недрах планет-гигантов Юпитера и Сатурна. Согласно совр. моделям, на Юпитере водород в молекулярной фазе присутствует только до глубин порядка 0,22 радиуса планеты [2]. На большей глубине водород в смеси с  $He$  образует жидкую металлич. фазу (рис. 2, 4)].

Сообщалось о получении М. в. в экспериментах по ударному сжатию и по сжатию в алмазных наковальных [5], однако надёжных эксперим. данных о давлении перехода и ур-нич. металлич. фазы пока нет.

Важность получения М. в. связана с тем, что в нём должен сочетаться ряд уникальных свойств. Во-первых, из-за малой массы атомов аномально велика *Дем-ва температура*  $\theta_D$ . Как следствие этого, темп-ра сверхпроводящего перехода  $T_c$  в твёрдой фазе при давлении порядка давления металлизации должна превышать 200 К, что значительно выше, чем у всех известных *сверхпроводников*, т. к.  $T_c \sim \theta_D$  [6].

Во-вторых, М. в. может существовать в виде *квантовой жидкости*. Малая масса атомов водорода приводит к большой величине амплитуды *квантовых колебаний* атомов, благодаря чему даже при  $T = 0$  К может не происходить кристаллизация. В противоположность известным квантовым жидкостям ( $^3He$  и  $^4He$ ) плавление кристаллич. М. в. наступает при возрастании давления. Надёжных расчётных данных о структуре и кривой плавления металлич. фазы пока нет. Согласно нек-рым расчётам, давление, при к-ром происходит плавление при  $T = 0$  К, порядка давления, необходимого для металлизации, т. е. в этом случае твёрдой фазы Н может не быть.

При снятии давления и обратном переходе из металлич. фазы в диэлектрическую выделяется энергия  $\sim 290$  МДж/кг, что в неск. раз выше, чем даёт любой известный вид топлива. Перспективы практич. использования М. в. в качестве аккумулятора энергии зависят от того, какие условия требуются для осуществления метастабильной металлич. фазы при частичном снятии веш. давления и каково её время жизни. Кроме протия  $^3H$  металлизация может происходить в кристаллах дейтерия  $^2H$  и трития  $^3H$ , с той лишь раз-

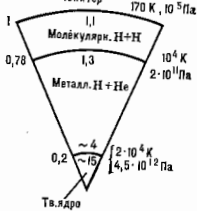


Рис. 2.

ницей, что квантовые свойства этих кристаллов выражены слабее, а тем-ра сверхпроводящего перехода  $T_c$  в них ниже.

Лит.: 1) Wigner E., Huntington H. B. On the possibility of a metallic modification of hydrogen, *J. Chem. Phys.*, 1935, v. 3, p. 746; 2) Stevens D. J., Interiors of giant planets, *Planet. Space Sci.*, 1982, v. 19, p. 29; 3) Кагал Ю., Пущкарев В., Холдас А., Уравнение состояния металлической фазы вольфрама, «ЖЭТФ», 1977, т. 73, с. 967; 4) Жакобс В. Н., Внутреннее строение Земли и планет, 2 изд., М., 1983, гл. 10; 5) Гуртовцев Ф. В. и др. Экспериментальное определение скин-слоев вольфрама при плотностях  $0,5 \pm 2 \text{ г/см}^3$ , «Листья в ЖЭТФ», 1972, т. 18, с. 286; 6) Росс М., Matter under extreme conditions of temperature and pressure, «Нерг. Прогр. Ривиз. 1985, ч. 48, p. 1; 7) Мид В. Л., Zallen H. J., P. Freeman A., Structural properties superconductivity and magnetism of metallic hydrogen, «Phys. Rev. B», 1984, v. 30, № 9, p. 5076. В. В. Авилов.

**МЕТАЛЛОПТИКА** — раздел физики, в к-ром изучаются оптич. и эл.-динамич. свойства металлов и взаимодействие с ними оптич. излучения.

В ИК- и видимой области оптич. диапазонов металлы отражают падающее излучение (металлич. блеск). Это объясняется преимущественным рассеянием света при его взаимодействии со свободными электронами, концентрация к-рых  $N$  достигает в металлах  $\sim 10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-3}$ . Электроны излучают в процессе рассеяния вторичные волны, к-рые при сложении формируют сильную отражённую волну. Поглощение квантов света непосредственно электронами проводимости возможно только при их одновременных (относительно редких) столкновениях с фононами, примесями, друг с другом, поверхностью металла, границами зёрен и кристаллитов. Столкновения и формирование из рассеянного света отражённой волны происходит в тонком приповерхностном слое (скин-слое толщиной  $\delta \ll 1 \text{ мкм}$ ), в к-ром затухает проникающее в металл излучение.

Роль свободных электронов во взаимодействии эл.-магн. излучения с металлами является определяющей в широком диапазоне частот (от радиодиапазона до ближнего ИК-диапазона).

В результате такого влияния оптич. и эл.-м. свойства металлов взаимосвязаны: чем больше статич. проводимость металла, тем сильнее он отражает свет. Отклонения возникают при низких тем-рах и на высоких частотах (видимая область спектра), когда важную роль играют квантовые эффекты, связанные с электронным рассеянием, межзонными переходами и др. В УФ- и более КВ-диапазонах с излучением взаимодействуют электроны внутр. оболочек атомов, и, напр., в рентг. области спектра металлы уже не отличаются от диэлектриков по оптич. свойствам.

Оптич. свойства металлов непосредственно связаны с величиной их проводимости  $\sigma(\omega)$ , зависящей от частоты  $\omega$ . В рамках классич. электродинамики оптич. свойства однородных изотропных металлов можно описать с помощью комплексного показателя преломления  $n' = \sqrt{\epsilon} = n + ik$ , где  $n$  — показатель преломления,  $k$  — показатель поглощения,  $\epsilon = \epsilon' + i(4\pi\sigma/\omega)$  — диэлектрич. проницаемость. Для изотропных металлов  $\epsilon$  — тензор. В радиодиапазоне свойства металлов характеризуются связанным с  $n'$  поверхностным импедансом  $Z = 4\pi/\sigma n'$ . Оптич. постоянные  $n$  и  $k$  зависят от частоты. При таком рассмотрении формализм М. и оптики прозрачных сред совпадает (то же волновое ур-ние, ф-лы Френеля и т. п.). При этом постоянная распространения света в металле является также комплексной величиной, как  $\epsilon$  и  $n'$ , что означает затухание эл.-магн. волны. Глубина, на к-рой величина эл.-магн. поля уменьшается в  $e$  раз (глубина скин-слоя),  $\delta = c/\omega k$ .

Общ. представления теории М. и объяснение спектральных зависимостей коэф. отражения  $R(\omega)$  и поглощения  $A(\omega)$  базируются на теории твёрдого тела и скин-эффекта в металле.

Вид зависимостей  $R(\omega)$  и  $A(\omega)$  определяется соотношением длины свободного пробега электронов  $l$ , длины

пробега  $\lambda$  электрона за период колебаний поля и величины скин-слоя  $\delta$  или соотношением частот падающего излучения  $\omega$ , плазменной частоты свободных электронов  $\omega_p = (4\pi N e^2/m^*)^{1/2}$ , частоты электронных столкновений  $\gamma$  и величины  $\Omega = \omega_p/c$ , характеризующей влияние на поглощение эффектов пространств. дисперсии проводимости. Здесь  $v$  — фермиевская скорость электрона,  $e$  — его заряд,  $m^*$  — эффективная масса. Типичные для металлов значения составляют:  $l = 0,03 - 0,1 \text{ мкм}$ ,  $\omega_p = (5 - 20) \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ ,  $\gamma = (2 - 50) \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ ,  $\Omega = (1 - 10) \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ .

При  $\gamma > \Omega$  связь между напряжённостью эл.-м. поля и плотностью наведённого тока проводимости локальна, т. е. либо  $l < \delta$ , либо  $s < \delta$ . При этом свет затухает с глубокой экспоненциальной (нормальная скин-эффект), а оптич. свойства описываются комплексной диэлектрич. проницаемостью  $\epsilon = (n + ik)^2$ . Входящие в неё показатели преломления ( $n$ ) и поглощения ( $k$ ) выражаются через  $\omega_p$  и  $\gamma$  с помощью дисперсионных ф-л классич. электронной теории металлов (ф-лы Друдо — Зинера):

$$n(\omega) = \frac{1}{\omega^2} \left[ \left( \frac{\gamma}{\omega} \right)^2 - (y - \epsilon_\infty)^2 \right]^{1/2} \mp (y - \epsilon_\infty)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $y = \omega_p^2 / (\omega^2 + \gamma^2)$ ,  $\epsilon_\infty \approx 1$  — высокочастотный предел диэлектрич. проницаемости металла при  $\omega \gg \omega_p$ . В ИК-области спектра ( $y \gg 1$ )

$$A(\omega) = \frac{4\pi}{(n+1)^2 + k^2} \approx 2\sqrt{2} \frac{\omega}{\omega_p} \left[ \left( 1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{c}{\omega} \left[ \frac{2(\omega^2 + \gamma^2)}{\omega(\omega^2 + (\omega^2 + \gamma^2)^{1/2})} \right]^{1/2}. \quad (3)$$

При низких частотах ( $\omega \ll \gamma$ ; область I, рис. 1) выполняются соотношения Хагена — Рубенса:

$$n \approx k \approx \frac{\omega_p}{\sqrt{2\gamma\omega}} \gg 1; \quad \delta = \frac{c}{\omega_p} \left( \frac{2\gamma}{\omega} \right)^{1/2}; \quad (4)$$

$$A = 2\sqrt{2} \frac{\sqrt{\gamma\omega}}{\omega_p} = 2\sqrt{\frac{\gamma}{2\pi\rho}},$$

где  $\rho$  — удельное статич. сопротивление металла. Для сплавов эти соотношения справедливы вплоть до средней ИК-области спектра (до длины волн  $\lambda \sim 5 - 10 \text{ мкм}$ , пока  $\delta > l$ ). При этом  $n \approx k \approx 10 - 50$ ,  $A \approx 0,04 - 0,2$ ,  $\delta \approx 0,1 - 0,3 \text{ мкм}$ .

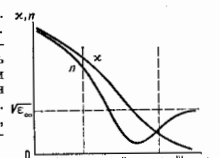


Рис. 1. Спектральные зависимости оптич. характеристик металла  $n$ ,  $k$ ,  $\delta$ ,  $A$  по теории нормального скин-эффекта: I — область соотношения Хагена — Рубенса; II — область релаксации (средней и ближней ИК-диапазон); III — область прозрачности (УФ-диапазон). По оси абсцисс — логарифмический масштаб частоты.

В ВЧ-области ( $\gamma < \omega \ll \omega_p$ ), охватывающей для хорошо отражающих металлов ближней и средней ИК-диапазон ( $\lambda \sim 1 - 10 \text{ мкм}$ ), оптич. характеристики определяются преим. недиссипативным затуханием света в электронной плазме металла (область II, рис. 1). Из (2) следует, что

$$n \approx \frac{\gamma\omega_p}{2\omega l} \ll 1, \quad k \approx \frac{\omega_p}{\omega} \gg 1, \quad (5)$$

$$\delta = \frac{c}{\omega_p}, \quad A = 2 \frac{\gamma}{\omega_p}$$

Глубина скин-слоя здесь составляет  $\sim 0,02 - 0,05 \text{ мкм}$ , а коэф. поглощения не зависит от частоты и определя-

ется эффективно столкновений электронов ( $A \approx \pm 0,01 - 0,1$ ). Скин-эффект близок к нормальному, т. к.  $s \ll l, \delta$ .

В видимой области спектра, наряду с внутривозможным поглощением света свободными электронами, на оптич. характеристики ряда металлов влияют межзонное поглощение, не описываемое теорией Друде - Зинера. Коэф. поглощения при этом возрастает до 0,2-0,5. В УФ-области при  $\omega > \omega_p$  (область III, рис. 1) для всех металлов типичен переход от сильного отражения к прозрачности, вследствие изменения характера поляризуемости среды и знака  $\epsilon'$ . При  $\omega \gg \omega_p$  отклик металлов на эл.-магн. воздействие связан с возбуждением излучения внутр. электронных оболочек атомов и аналогично отклику диэлектриков.

В табл. приведены значения величин  $n, k$  и  $R$  при комнатной темп-ре для нек-рых металлов в видимой и ИК-области.

Оптические характеристики некоторых металлов

	$\lambda = 0,5 \text{ мкм}$			$\lambda = 5,0 \text{ мкм}$		
	$n$	$k$	$R, \%$	$n$	$k$	$R, \%$
Cu . . . .	1,08	2,70	83,2	3,1	32,8	98,9
Ag . . . .	0,11	2,94	95,5	2,4	34,0	99,2
Au . . . .	0,50	2,04	68,8	3,3	35,2	98,95
Zn . . . .	—	—	—	3,8	26,2	97,9
Al . . . .	0,50	4,59	91,4	6,7	37,6	98,2
In . . . .	—	—	—	9,8	32,2	96,6
Sn . . . .	0,78	3,58	80,5	8,5	28,5	96,2
Pb . . . .	1,70	3,30	82,6	9,0	24,8	95,0
Ti . . . .	2,10	2,82	52,5	3,4	9,4	87,4
Nb . . . .	2,13	3,07	56,0	8,0	27,7	96,2
V . . . .	2,85	3,33	56,6	8,6	17,5	92,7
Mo . . . .	3,15	3,73	59,5	4,25	23,9	97,2
W . . . .	3,33	2,96	51,6	3,48	21,2	97,0
Fe . . . .	1,46	3,17	63,7	4,2	12,5	90,8
Co . . . .	1,56	3,43	65,9	4,3	14,6	92,9
Ni . . . .	1,54	3,10	61,6	4,95	18,5	94,8
Pt . . . .	1,76	3,59	65,7	7,7	20,2	93,7

Для наклонно падающего света коэф. отражения и поглощения, а также фазовые сдвиги  $\gamma$  при отражении зависят от состояния поляризации света. Для  $s$ -поляризов. излучения величина коэф. отражения  $R^s$  монотонно растёт с увеличением угла падения  $\alpha$ ; зависимость  $R^s(\alpha)$  для  $p$ -поляризов. излучения имеет вид кривой с минимумом при  $\alpha \approx \arccos(1/m)$ . При  $\alpha = 0$  и  $\alpha = \pi/2$  значения  $R^s$  и  $R^p$  совпадают. Вследствие отличия  $R^p$  от  $R^s$  и  $Q^p$  от  $Q^s$  при отражении от металла наклонно падающей линейно поляризованой. волны она становится эллиптически поляризованой. Это используется для определения оптич. параметров  $n$  и  $k$  (см. Френеля формулы).

Особенности в оптич. поглощении появляются при аномальном скин-эффекте, когда  $\gamma < \Omega$  или  $l > \delta = c/\omega_p$ . Строгая теория здесь основывается на решении кинетич. ур-ния для неравновесной  $f$ -функции распределения электронов по энергиям в поле световой волны. Из теории следует, что существует особое, поверхностное поглощение, к-рое зависит от типа рассеяния свободных электронов на поверхности металла и возникает вследствие пространств. дисперсии проводимости. В области частот  $\omega < \omega < \Omega$  (сильно аномальный скин-эффект) такой механизм поглощения является единственным, и определяемый им коэф. поглощения равен:

$$A = A_s = \frac{8\sqrt{3}}{9} \left(\frac{4}{3\pi}\right)^{1/2} \left(\frac{v}{c}\right)^{1/2} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^{3/2} \quad (6)$$

при зеркальном отражении электронов на поверхности и  $A = A_d = \frac{1}{2} A_s$  при их диффузном рассеянии. Вклад механизма существует и на более высоких частотах

( $\omega_p \gg \omega > \Omega$ ), когда слабо аномальное скин-эф-фекта), обусловленное им дополнительное [по отношению к (5)] поверхностное поглощение равно:

$$A_p = \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 p + \frac{3}{4} \frac{v}{c} (1-p). \quad (7)$$

В (7)  $p$  - феноменологич. коэф. Фукса зеркального отражения электронов ( $0 \leq p \leq 1$ ), зависящий от микрогеометрии поверхности. Хотя влияние шероховатости поверхности на рассеяние электронов, строго говоря, не описывается одним параметром  $p$ , его удобно использовать как подгоночный. При этом чисто зеркальное отражение ( $p = 1$ ) свойственно локально гладким поверхностям ( $h \leq 5 \text{ мкм} < L$ );  $h$  - среднеквадратичная высота шероховатей,  $L$  - коррел. длина. Для большинства реальных поверхностей  $p \approx 0$  (диффузное рассеяние электронов). В этих условиях  $A_p \approx A_{\text{Фукса}} \approx \approx 0,01$ . Аномальный скин-эффект набл. заметно влия-ет на ИК-поглощение благородных металлов (рис. 2).

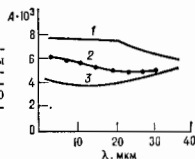


Рис. 2. Зависимости коэффициента поглощения серебра от длины волны при комнатной температуре: 1, 3 - расчет по теории аномального скин-эффекта при  $p=0$  и  $p=1$  соответственно; 2 - эксперимент.

В видимой области спектра существует дополни-тельное поглощение, связанное с возбуждением на шероховатостях локализов. и бегущих поверхностных эл.-магн. мод (см. Поверхностные оптические волны), к-рые диссипативно затухают при распространении вдоль поверхности металла.

Оптич. характеристики металла изменяются при нагревании вследствие температурной зависимости частоты электронных столкновений  $\gamma(T)$ . Согласно существующим представлениям, в величину  $\gamma$  вносят аддитивный вклад процессы электрон-фононного ( $\gamma_{ef}$ ), межэлектронного ( $\gamma_{ee}$ ) и электрон-примесного ( $\gamma_{ep}$ ) рассеяния. При низких темп-рах ( $T < \theta$ ,  $\theta$  - дебаевская темп-ра) коэф. поглощения минимален и определяется электронным рассеянием на поверхности и примесях, а также квантовыми эффектами в электрон-фононном взаимодействии. В среднем и ближнем ИК-диапазоне

$$A_{\text{мин}} = A_p + \frac{2\gamma_{ef}}{\omega_p} + \frac{4\gamma_{ee}}{5\omega_p} \left(1 - \frac{5\theta}{6\omega}\right). \quad (8)$$

где  $\gamma_0$  - частота электрон-фононных столкновений при дебаевской темп-ре. Напр., при  $T = 4,2 \text{ К}$  на  $\lambda = 10 \text{ мкм}$   $A_{\text{мин}} = 2 \cdot 10^{-3}$  ( $p = 1$ );  $6 \cdot 10^{-3}$  ( $p = 0$ ) - для меди и  $1,3 \cdot 10^{-3}$  ( $p = 1$ );  $4,7 \cdot 10^{-3}$  ( $p = 0$ ) - для серебра. При высоких темп-рах ( $T > \theta$ ) осн. вклад в  $\gamma$  и  $A$  вносит электрон-фононное столкновение, частота к-рых линейно растёт с  $T$ . Вследствие этого в том же частотном диапазоне

$$A(T) = A_0 + \eta T, \quad (9)$$

где  $A_0 \approx A_{\text{мин}}$  - не зависящая от  $T$  компонента поглощения,  $\eta$  - термопитч. коэф.  $\sim (1-5) \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ .

С появлением лазеров сформировался новый раздел физ. М., в к-ром изучается взаимодействие с металлами интенсивного лазерного излучения. В теории лазерного воздействия развиты осн. представления физ. М. о механизмах поглощения света и передачи поглощённой энергии. При поглощении квантов возрастает кинетич. энергия отд. электронов, к-рая за короткое время ( $\sim 10^{-12} - 10^{-13} \text{ с}$ ) перераспределяется между др. электронами в результате межэлектронного соударения и возрастает темп-ра электронного газа  $T_e$ . Далее эта энергия передаётся решётке за времена  $\tau \sim 10^{-11} -$

10<sup>-10</sup> с, что приводит к росту решётчной температуры ( $T_r$ ). Через время  $\sim 10^6$  обе темп-ры выравниваются ( $T_e = T_r = T$ ). Нагрев внутр. слоёв осуществляется за счёт электронной теплопроводности. Т. к. коэф. поглощения металлов увеличивается с нагревом ( $A \sim T$ ), то это ведёт к постепенному ускорению темпа разогрева металла лазерным излучением пост. плотности, вплоть до перехода к тепловой неустойчивости. При высоких интенсивностях и коротких воздействиях лазерного излучения  $T_e$  может значительно превышать  $T_r$ , а поглощение отличаться от равновесного. Помимо непосредств. роста темп-ры, к изменению коэф. поглощения  $A$  при лазерном нагреве на воздухе приводит окисление поверхности металла, сопровождающееся образованием поглощающих и интерференционных окисных плёнок, а также диффузией кислорода и кислородной металлы. Эти механизмы существенны при воздействии непрерывного интенсивного излучения. К росту  $A$  ведёт также образование на поверхности периодич. рельефа при нагреве металла в интерференц. поле падающего излучения и возбуждаемых им поверхностных ад.-магн. волн. Лазерное воздействие меняет также индикаторные отражения первоначально зеркальной металл. поверхности в результате появления заметного диффузного рассеяния света.

Отд. область М. составляют магнитооптич. явления в ферромагнетиках, заключающиеся во влиянии намагниченности на состояние поляризации при ограничении света от металла или прохождении его через тонкие плёнки (см. Керра эффект магнитооптический) и объясняемые в рамках квантовой теории взаимодействия внеш. и внутр. электронов ферромагнетика и влияния спин-орбитального взаимодействия на поглощение света.

В связи с развитием техн. оптики термин «М.» приобрёл ещё один смысл. Под М. понимаются также оптич. элементы и системы (в первую очередь зеркала), выполненные из металлов. Они используются в оптич. приборах разл. назначения (микроскопах, телескопах) в качестве экранов, отражателей и др. Широко распространение получила М. в криовакуумных системах, и в особенности в лазерной технике, где используются металл. зеркала в резонаторах CO<sub>2</sub>-лазеров. Методами алмазного точения удаётся получать гладкие металл. поверхности с коэф. отражения 98—99%, обладающие малым рассеянием.

Лит.: Соколов А. В., Оптические свойства металлов, М., 1961; Гуров К. П., Основания физической теории, М., 1966; Борн М., Вольф Э., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973; Действие излучения большой мощности на металлы, М., 1970; Ли Ф и др. Е. М., Пятаевская Л. П., Физическая кинетика, М., 1979. М. Н. Любимов.

**МЕТАЛЛОФИЗИКА** — раздел физики, в к-ром изучаются структура и свойства металлов и сплавов, взаимосвязь между ними и природа процессов, протекающих в металлах и сплавах. В отличие от физики металлов (где исследуются электронная структура металлов (электронный спектр) и связь её с электр. магн. и оптич. свойствами (см. Металлы), М. в основном занимается анализом кристаллич. структуры и связи её с решётчными (упругими, тепловыми, механическими) свойствами металлов и сплавов.

Центр. проблемой М. является изучение атомной структуры металлов и сплавов и её эволюции при изменении темп-ры, давления, магн. поля и др. Теория позволяет лишь в простейших случаях рассчитать характер кристаллич. структуры исходя из электронного строения атомов, и практически вся информация о кристаллич. решётках получена экспериментально (дифракция рентг. лучей, электронов, нейтронов, электронная микроскопия высокого разрешения, жёсткофокусная электронная микроскопия).

Кристаллич. структура чистых металлов характеризуется небольшим числом плотноупакованных решёток: объёмно центрированной кубической (ОЦК), гранецентрированной кубической (ГЦК), гексагональной плот-

ной упаковкой (ГПУ). Более сложные кристаллич. решётки присущи неким *лантаноидам* и *актиноидам* (Sn, Ga, In, Mn и др.). Для большинства чистых металлов при изменении темп-ры ( $T$ ) или давления ( $p$ ) наблюдаются полиморфные (аллотропич.) превращения. Для неких ферро- и антиферромагн. металлов превращения с изменением кристаллич. структуры наблюдаются и под воздействием магн. поля. Все полиморфные превращения являются фазовыми переходами 1-го рода и сопровождаются резким изменением большинства физ. свойств (см. Полиморфизм).

Металлич. сплавы представляют собой либо *твёрдые растворы*, когда атомы металла-растворителя и растворённого элемента образуют общую кристаллич. решётку, совпадающую с решёткой растворителя, либо т. н. интерметаллич. соединения, кристаллич. структура к-рых отличается от структуры чистых компонентов. Атомная структура сплавов определяется в основном соотношением размеров атомов компонентов и их электронным строением. Общим термодинамич. условием образования сплавов является минимум свободной энергии; этому условию могут соответствовать как монокристаллы, так и *гетерофазные структуры*. Обобщением данных о состоянии системы в зависимости от её состава,  $T$  (иногда и  $p$ ) служат фазовые диаграммы (*диаграммы состояния*). Фазовые диаграммы металл. систем могут быть рассчитаны лишь в простейших случаях; для экспериментального их построения используют разл. методы физ.-хим. анализа.

В зависимости от соотношения размеров атомов в сплавах могут образовываться твёрдые растворы с меньшими (атомы растворённого металла замещают в кристаллич. решётке атомы растворителя) и введёнными (атомы растворённого элемента располагаются в межатомных промежутках решётки растворителя). На базе интерметаллич. соединений могут образовываться твёрдые растворы (дефектные по одному из компонентов). Мин. значение свободной энергии твёрдых растворов соответствует упорядоченное расположение атомов разного сорта (*сверхструктуры*). Разрушение сверхструктур при высоких темп-рах сопровождается появлением аномалий ряда физ. свойств; превращение порядок—беспорядок в зависимости от состава сплава может быть фазовым переходом 1-го либо 2-го рода.

Интерметаллич. соединения условно подразделяют на электронные соединения, фазы введения, фазы с простыми стехиометрич. соотношениями, соединения с нормальной валентностью и др. Для электронных соединений характерно наличие почти пост. отношения числа валентных электронов к числу атомов ( $2/3$ ,  $21/13$  и  $7/4$  соответственно для  $\beta$ -,  $\gamma$ - и  $\epsilon$ -фаз). Фазы введения могут образовываться при определённых соотношениях атомных радиусов металлов и неметаллов. Простые стехиометрич. соотношения АВ<sub>2</sub>, АВ, АВ<sub>3</sub>, А<sub>2</sub>В присущи фазам Лавеса и родственными им соединениям (см. Интерметаллические соединения).

Кинетич. аспекты проблемы фазовых равновесий в сплавах изучает теория фазовых превращений, рассматривающая процессы зарождения и роста фаз при изменении  $T$ ,  $p$ , состава и т. п. В процессах превращений в сплавах существен. роль играют поля упругих напряжений и ограниченная диффузионная подвижность атомов. Наличие этих факторов обеспечивает, в частности, возможность протекания *мартенситных превращений*, заключающихся в реализации сдвиговых деформаций и небольших искажений кристаллич. решётки.

Микроскопия. структура реальных металлов (дефекты и примеси) и сплавов характеризует степень их отклонения от идеальной периодичности кристаллич. решётки. Спектр дефектов решёток металлов и сплавов включает вакансии, дислокации, межзеренные границы, поры, включения, трещины и т. п. Дислокац. представления являются основой теории прочности и пластич-

ности; с генерацией и эволюцией точечных дефектов — вакансий и внедрённых атомов — связано изменение свойств металлов и сплавов при облучении (см. *Радиационные дефекты*). Многие электрич., магн., упругие и др. свойства металлов и сплавов существенно зависят от их реальной макроскопич. структуры.

В М. изучаются *аморфные металлы* и сплавы, тонкие металлич. плёнки, квазиодномерные кристаллы (см. *Квазиодномерные соединения*), модулиров. структуры и др. термодинамич. неравновесные системы.

*Лит.*: Успехи физики металлов. Сб. ст., пер. с англ., т. 1—5, 9—10а, М., 1966—65; Физическое металловедение. Под ред. Р. Капа, пер. с англ., в. 1—3, М., 1967—68; Шульце Г. Р., Металлофизика, пер. с нем., М., 1971; Пирсон У. У., Кристаллография и физика металлов и сплавов, пер. с англ., ч. 1—2, М., 1977; Уманский И. С., Скаков Ю. А., Физика металлов, М., 1978; Барретт Ч. С., Маскалский Я. Т. В., Структура металлов, пер. с англ., ч. 1—2, М., 1984; Физическое материаловедение в СССР. История, современное состояние, перспективы развития, К., 1986. В. А. Физикель.

**МЕТАЛЛЫ** — традиционно определяются как конденсированное состояние вещества (твёрдое тело, жидкость), построенное из атомов М. в хим. понимании, т. е. легко отдающих электроны в процессе хим. реакции. Характерные признаки М.: высокие электро- и теплопроводность, причём электропроводность повышается с понижением темп-ры  $T$ , а также пластичность.

**Металлическое состояние.** Основанием для выделения М. в отд. класс веществ служит деление всех веществ по электрич. свойствам на проводники и изоляторы (полупроводники и полуметаллы занимают промежуточное положение). М. — проводники. Однако некие элементы в зависимости от кристаллич. структуры могут быть проводниками (М.), изоляторами (*диэлектриками*), *полупроводниками* или *полуметаллами*. Примеры: Sn (белое олово — М., серое — полупроводник); С (графит — полуметалл, алмаз — диэлектрик, см. *Полуметаллы*). В результате можно говорить о металлич. состоянии вещества, понимая под этим такое состояние, при к-ром в теле есть достаточно большое кол-во коллективных, подвижных электронов (электронов проводимости или свободных электронов), причём их подвижность не есть результат термич. возбуждения; если тело в данном состоянии существует вплоть до  $T = 0$  К, то и при  $T = 0$  К в нём есть электроны проводимости. Наличие электронов проводимости — обязательн. признак структуры М. Представление о М. как о веществе, состоящем из положит. ионов и свободных электронов, достаточно точно отражает строение реальных М. Электроны концентрируют силы отталкивания, действующие между коллективно заряженными ионами, и тем самым связывают их в твёрдое тело или жидкость. Электроны проводимости «ределяют» не только электрич., магн., оптич. и др. типично электрич. свойства, но и их теплопроводность, а при низких темп-рах — теплоёмкость. Существенная роль электронов в эжмеханике М. и др. механич. характеристиках, их наличие делает М. пластичными.

Фазовые переходы в М. сопровождаются изменением свойств электронной системы. Иногда причиной перехода служит изменение электронного спектра, а изменение кристаллич. структуры носит вторичный характер [напр., переход из нормального состояния М. в сверхпроводящее или из парамагнитного в ферромагн. антиферромагнитное (ФМ, АФМ, табл. 1)]. В твёрдых состояниях М. кристаллы (в паровом состоянии — одновалентные газы). Темп-ры плавления  $T_{пл}$  всех М. выше 300 К (кроме Hg с  $T_{пл} = 38,9$  °C), так что в обычных условиях М. — твёрдые тела. При плавлении М. сохраняет металлич. свойства (см. *Жидкие металлы*). Искусственно созданы аморфные твёрдые М. (см. *Аморфные металлы*, *Металлические стекла*).

В металлич. состоянии могут находиться сильно деформ. полупроводники (электроны проводимости в них существуют при  $T = 0$  К), а также вещества, состоящие из неметаллич. атомов, напр. полуметаллич. кри-

сталл (SN)<sub>2</sub>. Металлич. свойствами обладают некие-ры мн. соединения, напр. кристаллы оксидов типа MO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>, халькогенидов (NbSe<sub>2</sub>, TaS<sub>2</sub>) и более сложных соединений (AuTe<sub>2</sub>, Вг и др. кристаллы, содержащие органич. комплексы, см. *Органические проводники*), а также многокомпонентные материалы со структурной структурой типа (напр., YBaCu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>) или со слоистой структурой (напр., Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Co<sub>2</sub>O<sub>10</sub>), являющиеся высокотемпературными сверхпроводниками (напр., темп-ра сверхпроводящего перехода  $T_c$  в YBaCu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>  $\approx 100$  К). К М. относят *интерметаллические соединения* типа Cs<sub>2</sub>Xn (β-латунь), AgZn и др. к-рые от обычных М. отличаются лишь более сложной кристаллич. структурой.

Большинство М. кристаллизуются в структуры, отвечающие плотной упаковке атомов с границевров. кубической (ГЦК) и гексагональной (гек) решётками (обе имеют макс. *координационное число* — 12). Др. решётки М. тоже достаточно просты: объёмноцентрированная кубическая (ОЦК) у щелочных М., тетрагональная (тетр) с 1—2 атомами в элементарной ячейке. Лишь небольшое число М. имеют более сложное строение (слож.), напр. Mn, в элементарной ячейке к-рого 58 атомов (табл. 1).

За исключением Au, Ag, Pt, Sn, встречающихся в самородном состоянии, остальные М. в природе существуют в составе хим. соединений — оксидов, сульфидов и др., образующих руды. Относит. распространённость нек-рых М. в земной коре приведена в табл. 2.

Табл. 2.

Металл	Количество, %	Металл	Количество, %	Металл	Количество, %
Al	8,8	Cu	0,6	W	0,2
Fe	5,1	Ni	0,09	Sb	0,015
Mg	2,1	Zn	0,02	Ag	0,04
Ti	0,008	Co	3 · 10 <sup>-4</sup>	Pb	5 · 10 <sup>-4</sup>
Mn	0,02	Pb	2 · 10 <sup>-4</sup>	Pd	1 · 10 <sup>-5</sup>
Cr	0,003	Nb	1 · 10 <sup>-6</sup>	Au	5 · 10 <sup>-7</sup>
Zr	0,0016	Mo	4 · 10 <sup>-6</sup>	Pt	5 · 10 <sup>-7</sup>
V	0,001	Ta	1 · 10 <sup>-6</sup>	Ir	1 · 10 <sup>-7</sup>

Промышл. использование М. прямо не связано с их распространённостью в земной коре, а зависит от развития способов извлечения М. из руд, очистки, потребностей техники и т. и. Широкое применение самого распространённого на Земле М. — Al началось лишь в 20 в. По-видимому, первый М., использованный человеком, — Cu.

Обычно анизотропия свойств М., напр. анизотропия электропроводности о, выражена слабо. Однако в ряде случаев особенности структуры, напр. слоистое строение графита, графита, интеркалированного примесями (см. *Интеркалированные соединения*), дихалькогенидов, приводят к различию о вдоль и поперёк слоям на нек-рых порядках. В комплексных соединениях, обладающих металлич. свойствами, таких, как K<sub>2</sub>Pt(CN)<sub>6</sub> · x · 27H<sub>2</sub>O или в соединениях, молекулы к-рых содержат комплекс тетрадиоксиодиметана (TCNQ), проводимость осуществляется по ионичным металлич. атомам. Вдоль этих цепочек она на много порядков выше, чем проводимость в поперечном направлении (см. *Квазиодномерные соединения*). Двумерные М. создают искусственно, напр. в тонких плёнках (см. *Квазидвумерные соединения*).

Число электронов проводимости в 1 см<sup>3</sup> (или их число на элементарную ячейку кристалла либо на 1 атом) — важнейшая характеристика металлич. состояния. Как правило, из всех атомарных электронов «свобождаются» (коллективизируются) только валентные. Это даёт возможность по хим. свойствам атомов, из к-рых состоит кристалл, и по его геом. структуре определить  $n$  как  $Z/n_0$ , где  $Z$  — число валентных электронов в элементарной ячейке объёма  $v_0$  (табл. 3).

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА  
СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

$d$  — плотность,  $\vartheta$  — температура Дубин,  $\rho$  — удельное сопротивление при  $0^\circ \text{C}$  (для монокристаллов ср. величины),  $T_c$  — температура перехода в сверхпроводящее состояние,  $\varphi$  — работа выхода

$Z$  — атомный номер  
 $\varphi_{\text{II}}, \varphi_{\text{I}}$  — потенциалы ионизации  
 $\vartheta_{\text{D}}, \vartheta_{\text{K}}$  — температуры Дебая и Кельвина  
 $T_{\text{пл}}, T_{\text{к}}$  — температуры плавления и кипения  
 $\rho_{\text{II}}, \rho_{\text{I}}$  — удельные сопротивления при  $10^\circ \text{C}$  и  $20^\circ \text{C}$

1	la	IIa	IIIa	IVa	Va	VIIa	VIa	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500
---	----	-----	------	-----	----	------	-----	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

ЛАНТАНОИДЫ

АКТИНОИДЫ

Табл. 3. Плотность электронов проводимости и энергия Ферми  $\epsilon_F$  ряда металлов

Металлы	Li	Na	Cu	Ag	Be	Ca	Zn	Al	Pb
$n \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$	4,7	2,85	8,45	5,85	24,2	4,6	13,1	18,6	13,2
$\epsilon_F, 10^4 \text{ К}$	5,5	3,75	8,1	6,4	16,4	5,4	10,9	13,5	10,9

Природа металлического состояния. Мн. характерные свойства М. можно понять, считая, что электроны проводимости — идеальные вырожденный газ фермионов, а роль иона сводится к созданию потенциальной ямы, в к-рой движутся электроны (теория Друде — Лоренца — Зоммерфельда; см. *Другие модели металлов, Зоммерфельда теория металлов*). Темп-ра вырождения  $T_F$  электронного газа в этой модели определяется энергией Ферми  $\epsilon_F$ :

$$T_F = \epsilon_F/k, \quad \epsilon_F = \frac{(3\pi^2 n)^{2/3} \hbar^2}{2m}$$

( $m$  — масса электрона). Темп-ра  $T_F \approx 10^4 - 10^5 \text{ К}$ . Поэтому практически при любой темп-ре  $T$ , при к-рой вещество существует в конденсированном состоянии, электронный газ в М. вырожден ( $T < T_F$ ) (см. *Вырожденная температура, Вырожденный газ*).

Более полное и строгое объяснение свойств М. даёт зонная теория твёрдого тела. Зонная теория исходит из рассмотрения движения отд. электрона в периодич. поле сил  $U(r)$ , создаваемых ионами кристаллич. решётки и в остальных электронами (одн. из электр. решётки при бл. и же и е);

$$U(r+a) = U(r),$$

где  $r$  — пространств. координата точки,  $a$  — период решётки (см. *Возбуждённые электроны*). Хотя энергия взаимодействия электронов друг с другом не меньше, чем энергия взаимодействия с ионами, одноэлектронное приближение имеет обоснование. Во-первых,  $U(r)$  включает совокупное действие всех остальных электронов, кроме рассматриваемого, причём для качеств. выводов потенциал  $U(r)$  можно не конкретизировать, используя только его свойства симметрии (прежде всего периодичность). Во-вторых, построив одноэлектронное приближение, можно обобщить его, учтя взаимодействие между электронами проводимости (на основании теории ферми-жидкости).

Периодичность  $U(r)$  позволяет характеризовать стационарное состояние электрона проводимости квазиимпульсом  $p = \hbar k$  ( $k$  — квазиволновой вектор), аналогичный импульсу частицы в свободном пространстве. Волновая ф-ция электрона в стационарном состоянии — решение Шрёдингера уравнения для электрона, отвечающая собств. значению энергии электрона  $\epsilon_n$ . И волновая ф-ция и собств. значение энергии (в отличие от случая свободного электрона) — периодич. ф-ции квазиимпульса. Периодичность в импульсном пространстве — следствие полной физ. эквивалентности состояний с квазиволновыми векторами, отличающимися на  $2\pi\hbar/b$ . Это означает, что для полного описания всех состояний достаточно использовать  $p$  из одной ячейки обратного пространства. Как правило, её выбирают в виде первой Бриллюэна зоны. Индекс  $s$ , нумерующий решётки ур-ния Шрёдингера, наз. номером зоны,  $\epsilon_s(p)$  — законом дисперсии электронов или электронным спектром кристалла, соответствующим полю  $U(r)$ . В каждой разрешённой энергетич. зоне состояния электронов заполняют полосу между  $\epsilon_{\text{мин}}$  и  $\epsilon_{\text{макс}}$ . Зоны могут перекрываться, но их индивидуальность при этом сохраняется. Перекрывание зон, как правило, не сопровождается вырождением. Вырождение наступает при совпадении энергий (из разных зон) и квазиимпульсов. Вырождение накладывает ограничение на структуру изоэнергетич. поверхности вблизи точки вырождения. С помощью законов дисперсии можно рассчитать плотность электронных состояний в зоне  $g(\epsilon)$ .

Сходство и различие между свободными электронами и электронами проводимости иллюстрируется табл. 4.

Табл. 4.

Свободный электрон	Электрон проводимости
	Стационарная волновая функция
$\psi = A \exp(ipr/\hbar)$	$\psi_s = u_s(r) \exp(ipr/\hbar)$ $A = \text{const}$   $u_s(r+a) = U_s(r)$
	Энергия
$\epsilon = p^2/2m_0$	$\epsilon_s(p) = \epsilon_s(p_0 + 2\pi\hbar b)$ , где $b$ — вектор обратной решётки
	Изоэнергетическая поверхность
Сфера $p^2 = 2m_0 \epsilon$	периодич. поверхность $\epsilon_s(p) = \text{const}$
	Скорость
$v = p/m_0$	$v(p) = \frac{\partial \epsilon_s(p)}{\partial p}$
	Масса
	тензор обратных эффективных масс $\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 \epsilon_s}{\partial p^2}$ эффективная масса и магн. поле $\hbar(H_x = H_y = 0, H_z = H)$ $m = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial S(\epsilon, p)}{\partial \epsilon}$ ( $S$ — площадь сечения изоэнергетич. поверхности $\epsilon_s(p) = \text{const}$ по отношению к $p_x = \text{const}$ )
$m_0$	
	Законы сохранения при столкновении двух электронов
	$\epsilon_1 + \epsilon_2 = \epsilon'_1 + \epsilon'_2$
	$p_1 + p_2 = p'_1 + p'_2$   $p_1 + p_2 = p'_1 + p'_2 + 2\pi\hbar b$ (начальные $p_1, p_2$ и конечные $p'_1, p'_2$ — квазиимпульсы на первой зоне Бриллюэна)
	Плотность состояний ( $V$ — объём кристалла)
$g(\epsilon) = \frac{V}{\pi\hbar^3} \sqrt{2m_0 \epsilon}$	$g(\epsilon) = \frac{2V}{(2\pi\hbar)^3} \oint \frac{df}{v}$ где $df$ — элемент площади на поверхности $\epsilon_s(p) = \epsilon$ , по которой ведётся интегрирование
	Энергия Ферми
$\epsilon_F = \frac{(3\pi^2 n)^{2/3} \hbar^2}{2m_0}$	$\frac{\Omega_s(\epsilon_F)}{4\pi^3 \hbar^3} = n_s$ ( $\Omega_s$ — объём в $p$ -пространстве листа поверхности Ферми в $s$ -й зоне, $n_s$ — плотность в ней электронов)

Зонный характер спектра и Паули принцип позволяют сформулировать принципиальное отличие М. от диэлектрика. Т. к. в каждую зону может «поместиться» не более  $2N$  электронов ( $N$  — число ячеек в кристалле), то в зависимости от числа электронов, приходящих на ячейку, и взаимного расположения зон могут осу-

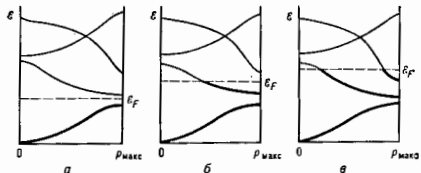


рис. 1. Схема заполнения зон диэлектрика или полупроводника (а), металла (б), полуметалла (в). Жирные линии  $\epsilon(p)$  — заполненные состояния, тонкие — пустые; нули — уровни химического потенциала; совпадающий в металлах с энергией Ферми  $\epsilon_F$  при  $T = 0 \text{ К}$ ,  $p_{\text{макс}}$  — максимальный квазиимпульс, соответствующий границе зоны Бриллюэна.



существовать 2 случая: либо в осн. состоянии (при  $T = 0$ ) имеются только щелью заполненные зоны и пустые (рис. 1, а), либо есть зоны, частично заполненные электронами (рис. 1, б, в). В первом случае кристалл — диэлектрик (или полупроводник), во втором — М. (рис. 1, в соответствует полуметаллу).

**Поверхность Ферми.** В М. граница заполнения уровней электронами попадает в разрешённую зону и наз. энергией Ферми  $\mathcal{E}_F$ . Соответствующая ей изоэнергетич. поверхность

$$\mathcal{E}(p) = \mathcal{E}_F$$

наз. поверхностью Ферми. Поверхность Ферми отделила область занятых электронами состояний в импульсном пространстве от свободных.

Поверхность Ферми — объект атрибут металл. состояния кристаллов. Если поверхность Ферми пересекает границы зоны Бриллюэна (напр., у Cu), то удобно использовать расширенное  $p$ -пространство. В этом случае отчётливо видна его периодичность. У щельных металлов (Li, Na, K, Pb, Cs) поверхности Ферми — почти идеальные сферы. Это не означает, что электроны этих металлов не испытывают влияния ионов. Их эффективные массы  $m = p_F/v_F$  отличаются от массы свободного электрона  $m_0$  (табл. 4), напр. у Na  $m = 1,24 m_0$ . У всех М., кроме перечисленных, а также у Au, Ag, Cu поверхности Ферми состоят из неск. полостей-листов и имеют сложную форму (рис. 2).

Из-за столкновений электронов с дефектами решётки, друг с другом, а также с фононами состоя-

ние электрона проводимости имеет конечное время жизни  $\tau(p)$ . Это означает, что мнимая часть ф-ции  $\mathcal{E}_s(p)$  отлична от 0;  $\text{Im}\mathcal{E}_s(p) = \hbar/\tau_s(p) \neq 0$ . Это не лишает поверхность

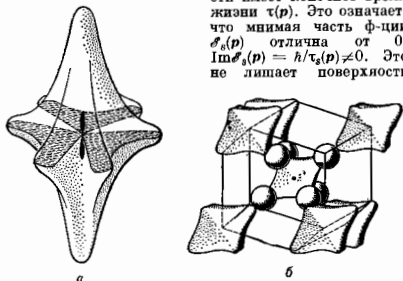


Рис. 2. Поверхности Ферми W (ОПР, а), Gd (гексагональная решётка, б).

Ферми  $\mathcal{E}_s(p) = \mathcal{E}_F$  строго определённого смысла, т. к.  $\text{Im}\mathcal{E}_s(p)$ , объясняемая неупругим столкновением (электронов с фононами или друг с другом), для электронов на поверхности Ферми равна 0. Упругие столкновения со статич. дефектами приводят к «перемещению» электронов по поверхности Ферми. Если время жизни ( $\tau$ ) электрона мало (много дефектов, высокая темп-ра), то строгое описание его движения с помощью закона дисперсии теряет смысл. При этом лишается смысла и т. п. тонкая структура поверхности Ферми (отклонение от сферичности), хотя подвижность электрона сохраняется — электроны проводимости остаются делокализованными (их длина пробега существенно превышает межатомное расстояние). Приближённое описание электронов в таких условиях возможно лишь с помощью модели Друде — Лоренца — Зоммерфельда.

Нек-рые свойства М. (гл. обр. в сильном магн. поле) очень чувствительны к форме поверхности Ферми (де Хааза — ван Альфена эффект, Циклотронный резонанс, геом. резонанс и др.). Они позволили восстановить по-

верхность Ферми практически для всех моноатомных М. и мн. интерметаллич. соединений ( $\text{AuAl}_2$ ,  $\text{AuGa}$ ,  $\text{CuZn}$ ,  $\text{AuTeI}$  и др.), а также в большом числе случаев определить скорости фермиевских электронов  $v_F$  (щельные, благородные М., Bi, Sb и др.).

Методы зонной теории (с использованием ЭВМ) позволили определить законы дисперсии с большой точностью. Все вычислит. методы основаны на приближении почти свободных электронов (модель Гаррисона, или метод псевдопотенциала) и (или) на т. н. приближении сильной связи я. Они дают возможность выяснить происхождение отд. характерных деталей электронного спектра М.: наличие или отсутствие т. н. листов поверхности Ферми, величину и зависимость плотности состояний от энергии  $g(\mathcal{E})$  (рис. 3); значение скоростей

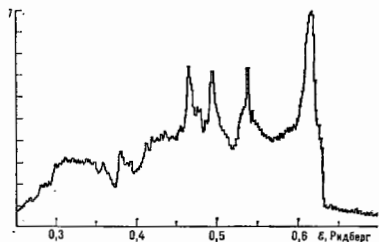


Рис. 3. Вычисленная зависимость плотности состояний от энергии  $g(\mathcal{E})$  для  $d$ -электронов в Ni.

электронов, а также величину эфф. потенциала (или псевдопотенциала), определяющего электронный энергетич. спектр конкретного М.

При всей сложности законов дисперсии представление об электронах М. как лёгких (по сравнению с ионами) заряженных частицах качественно правильно. Оно, возвращая нас к модели Друде — Лоренца — Зоммерфельда, даёт возможность оценивать порядок величин осн. характеристик М. — электронную теплоёмкость, эл. и теплопроводность, толщину скин-слоя (см. Скин-эффект) и т. д. Правда, нек-рые соединения ( $\text{CeAl}_3$ ,  $\text{CeCu}_6$ ,  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ ,  $\text{UB}_{13}$  и др.) обнаруживают необычные свойства (напр., гигантскую электронную теплоёмкость), заставляющие сделать вывод, что в них есть электроны, обладающие аномально большой эфф. массой  $m$  ( $m/m_0 \sim 400-600$ ). Эти электроны получили назв. тяжёлых фермионов.

При  $T = 0$  К все электроны проводимости находятся на и внутри поверхности Ферми. Элементарные возбуждения электронной подсистемы М. — электроны с энергией  $\mathcal{E} > \mathcal{E}_F$  и дырки — свободные состояния с энергией  $\mathcal{E} < \mathcal{E}_F$ . Т. к. обычно  $kT \ll \mathcal{E}_F$ , то осн. роль в процессах переноса играют электроны и дырки с энергиями  $\mathcal{E} \ll \mathcal{E}_F$ . Их закон дисперсии можно считать линейным:

$$\xi = \mathcal{E} - \mathcal{E}_F = v_F(p - p_F) \quad \text{— для электрона,} \quad (1)$$

$$\xi = \mathcal{E}_F - \mathcal{E} = v_F(p_F - p) \quad \text{— для дырки}$$

( $v_F$  — скорость на поверхности Ферми). Энергию электрона (при  $\mathcal{E} > \mathcal{E}_F$ ) и дырки принято отсчитывать от  $\mathcal{E}_F$  (скорость дырки —  $v_F$ ). Спектр электронов и дырок демонстрирует наличие разрешённых значений энергии над поверхностью Ферми (рис. 4, а).

При фазовом переходе электронный спектр М. (в частности, поверхность Ферми) изменяется. Если это переход 1-го рода, то новая поверхность не связана со старой. Если же это переход 2-го рода, то обе поверхности Ферми в момент перехода совпадают и можно проследить, как трансформируется поверхность. На рис. 5

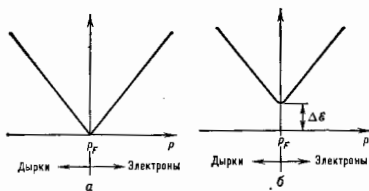


Рис. 4. Спектр электронных возбуждений  $\epsilon^e(p)$ : а — в нормальном металле; б — в сверхпроводнике.

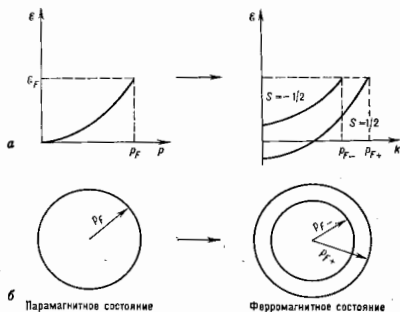


Рис. 5. Изменение спектра электронов (а) и трансформация поверхности Ферми (б) при переходе металла в ферромагнитное состояние.

показано снятие вырождения по спину и изменение поверхности Ферми при переходе М. из парамагн. состояния в ферромагнитное (поверхость Ферми — сфера). При переходе М. в сверхпроводящее состояние в спектре электронов возникает щель  $\Delta \epsilon$  — область запрещённых значений энергии (рис. 4, б), к-рая обеспечивает диссипативный характер сверхпроводящего тока (см. *Сверхпроводимость*). Внеш. воздействие на М. (напр., давление) может привести к изменению связности поверхности Ферми: либо образуется новый лист, либо рвется перемычка между листами. Это сопровождается аномалиями электронных характеристик. При  $T = 0\text{K}$  такой переход следует считать фазовым переходом  $2\frac{1}{2}$ -го рода (см. *Ван Хова особенность*). Нек-рые фазовые переходы в М. связаны с межэлектронными взаимодействиями, к-рые приводят к возникновению *волн зарядовой плотности* или волн спиновой плотности, а также к *высокороской кристаллизации*.

Исследования поверхности твёрдых тел привели к появлению *двумерного электронного газа* — искусств. двумерного М., обладающего рядом особенностей; напр., поверхность Ферми двумерного М. — линия, и все особенности, обусловленные её изменением в двумерном М., выражены отчетливее, чем в трёхмерном.

При достаточно высоких давлениях, когда объём, приходящийся на 1 атом, становится меньше обычных атомных размеров, атомы теряют свою индивидуальность и любое вещество превращается в сильно сжатую электронно-ядерную плазму, т. е. в своеобразный М. Металлизация любого вещества происходит при плотности  $\geq 20Z^2 \text{ г/см}^3$ , где  $Z$  — ат. номер вещества. При таких плотностях большинство свойств вещества определяется вырожденным электронным газом.

**Электрические свойства.** Характерное свойство М. как проводников электрич. тока в нормальном (несверх-

проводящем) состоянии — линейная зависимость между плотностью тока  $j$  и напряжённостью приложенного электр. поля  $E$  (*Ома закон*):

$$j_i = \sigma_{ik} E_k, \quad E_i = \rho_{ik} j_k, \quad \rho_{ik} = \sigma_{ik}^{-1}. \quad (2)$$

Тензор уд. электропроводности  $\sigma_{ik}$  (или тензор сопротивления  $\rho_{ik}$ ) — важнейшая характеристика М. Число независимых компонент тензора  $\sigma_{ik}$  (или  $\rho_{ik}$ ), а значит и тип анизотропии сопротивления, зависит от *симметрии кристалла*. Для кубич. кристаллов и неметаллов, поликристаллов тензор превращается в скаляр (табл. 2).

Носители заряда в М. — электроны проводимости с энергией, близкой к  $\epsilon_F$ . Причиной сопротивления служат рассеяние электронов на любых нарушениях периодичности кристаллич. решётки. Это тепловые колебания ионов (фононы), сами электроны (см. *Межэлектронное рассеяние*), а также разл. дефекты — примесные атомы, вакансии (сечение рассеяния  $10^{-16}$ – $10^{-15} \text{ см}^2$ ), дислокации (сечение  $10^{-9}$ – $10^{-7} \text{ см}^2$ ), границы кристаллов и образца (см. *Рассеяние носителя заряда*).

Мерой проводимости служит длина свободного пробега ( $l$ ) электронов:

$$\sigma = \frac{e^2 n S_F}{12 \pi^4 \hbar^2 v_F}, \quad (3)$$

где  $S_F$  — площадь поверхности Ферми. Для сферич. поверхности Ферми

$$\sigma = \frac{ne^2}{\rho F} = \frac{nev_F}{m}; \quad v = \frac{l}{\tau}; \quad m = \frac{p_F}{v_F} \quad (4)$$

( $v_F$  — скорость фермиевских электронов). При  $T = 300 \text{ K}$   $l \sim 10^{-8} \text{ см}$ , с понижением  $T$  пробег  $l$  растёт, достигая (для специально очищенных образцов) 0,1–1 см. Соответственно возрастает проводимость. Отношение проводимости при  $T = 0\text{K}$  ( $\sigma_0$ ) к проводимости при 300 К ( $\sigma_{300}$ ) характеризует совершенство и хим. чистоту М. Достигнутые значения  $\sigma_0/\sigma_{300}$ :  $5 \cdot 10^8$  (Ga);  $10^8$  (Mo);  $(3-4) \cdot 10^8$  (In, Sn, Cd, Hg, W);  $(7-8) \cdot 10^8$  (Au, Cu, Zn);  $(7-9) \cdot 10^8$  (Na, K, Fe).

Отсутствие коррелиции между разл. механизмами рассеяния приводит к приближённому соотношению  $1/l = \Sigma l_i$ , где  $l_i$  — длина свободного пробега относительно определённого механизма рассеяния. Этим объясняется эмпирич. *Маттиссена правило*, согласно к-рому сопротивление конкретного образца М. есть сумма остаточного сопротивления  $\rho_0$ , обусловленного рассеянием на дефектах решётки (совпадает с  $\rho$  при  $T = 0\text{K}$ ), и сопротивления идеального кристалла  $\rho_{ид}$ , обусловленного рассеянием на фононах и др. квазичастицах. Гл. причина температурной зависимости — рассеяние электронов на фононах. При  $T \gg \theta_D$  ( $\theta_D$  — *Дебая температура*)  $\rho \approx \rho_{ид} \sim T$ , причём типичное значение  $(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT})$  при  $T = 300 \text{ K}$  равно  $4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . При  $T \ll \theta_D$  фоновая часть выделит к 0, что позволяет в ряде случаев выделить в зависимости  $\rho_{ид}(T)$  вклад рассеяния на электронах, к-рый пропорц.  $T^2$  (рис. 6).

Сопротивление сплавов и М. типа керамики значительно выше, чем у чистых М. Причина этого в нарушении идеальности решётки (разл. атомы в узлах решётки) и в её дефектности. Предельное уд. сопротивление М., достигаемое при

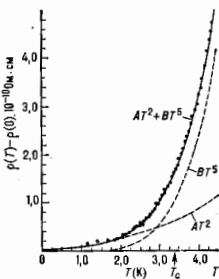


Рис. 6. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от  $T$ . Точка — измеренные значения на вычитом остаточного сопротивления,  $8,8 \cdot 10^{-10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ; сплошная линия — зависимость вида  $A7^2 + B7^5$ , представляет сумму электрон-электронного и электрон-фононного вкладов.

$l \sim h/p_F \sim a$ , равно  $ah/e^2$  (в трёхмерном случае) и  $lh/e^2$  (в двумерном). В веществах с большим  $r$  возникает локализация электронных состояний — проводимость исчезает (см. *Андерсоновская локализация*). При этом исчезновение проводимости происходит не за счёт «связывания» электронов ионами — электроны остаются коллективизированными (в том смысле, что их волновая функция «размазана» на расстояния, много большие атомных).

При плавлении подвижные электроны в М. сохраняются, поэтому сохраняется большая электропроводность, хотя разрушение дальнего порядка приводит к скачкообразному росту  $r$  (табл. 5; см. также *Жидкие металлы*). Исключение составляют Sb, Ga, Bi, у которых при плавлении  $r$  уменьшается (для этих М. плавление сопровождается увеличением плотности).

Табл. 5.— Отношение удельных сопротивлений в твёрдой ( $\rho_n$ ) и жидкой ( $\rho_m$ ) фазах при температуре плавления

Металл	Li	Na	Fe	Cu	Au	Ga	Sb	Bi
$\rho_m/\rho_n$ . . . . .	1,68	1,44	1,09	2,07	2,28	0,58	0,67	0,4

Большинство М. при  $T \rightarrow 0$  К теряют сопротивление — переходят в сверхпроводящее состояние. Для таких М. зависимость  $\rho(T)$  при  $T \rightarrow 0$  К определяют, разрушив сверхпроводящее состояние магн. полем  $H > H_{кр}$  (см. *Сверхпроводимость*).

**Теплоёмкость.** Существование в М. вырожденного электронного газа большой плотности приводит к линейной зависимости теплоёмкости М. от  $T$  при низкой темп-ре (рис. 7). Вклад электронов в теплоёмкость М.

$$C_a = \alpha T; \quad \alpha = \frac{\pi^2}{3} k_F^2 \epsilon_F \quad (5)$$

где  $\epsilon_F$  — суммарная (по всем частично заполненным зонам) плотность электронных состояний при  $\epsilon = \epsilon_F$ . Измерение  $C_a$  — один из осн. методов определения ( $\epsilon_F$ ) (табл. 6).

Рис. 7. Низкотемпературная теплоёмкость нормального ( $C_n$ ) и сверхпроводящего ( $C_s$ ) Al (при  $T < T_c$  значения  $C_n$  измерены на образцах, в которых сверхпроводимость была разрушена магнитным полем).

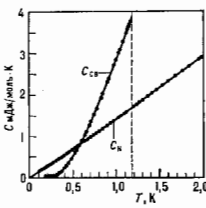


Табл. 6.— Значения постоянной  $\alpha$ , определённые по электронной теплоёмкости  $C_a$

Металл	Li	Be	Al	Sc	Cu
$\alpha$ , мДж/(моль · К) . .	1,63	0,17	1,25	10,7	0,695

Металл	Nb	Sb	Au	Bi
$\alpha$ , мДж/(моль · К) . .	7,79	0,11	0,729	0,008

Электроны проводимости вносят линейный по  $T$  вклад не только в теплоёмкость М., но и в его коэф. теплового расширения. Из-за этого в М. нарушается *Грюнайзен закон*: при низких темп-рах ( $T \ll \sqrt{V_D T_F}$ ) константа в законе Грюнайзена определяется электронной подсистемой, а при высоких  $T \gg \theta_D$  — фоновой (ионными решётки).

**Теплопроводность, термоэлектрические явления.** Электроны проводимости принимают участие не только в переносе электрич. заряда, но и в переносе тепла. Вследствие большой подвижности электронов теплопроводность М. велика. Величины электропроводности и

электронной части теплопроводности М.  $\bar{L}$  связаны соотношением (*Видемана — Франца закон*):

$$\frac{\bar{L}}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k}{e} \right)^2 \quad (6)$$

Оно выполняется тем лучше, чем строже столкновение электронов можно считать упругими (при  $T \gg \theta_D$ , а также и при  $T = 0$  К, когда осн. причина сопротивления — столкновение с дефектами кристалла). При наличии градиента темп-ры  $\nabla T$  в М. возникает элктрич. ток, или связанная с  $\nabla T$  разность потенциалов (*термоэдс*). Из-за выхождения электронного газа коэф., описывающие термоэдс и др. термоэлектрич. эффекты, малы, однако их исследование позволяет обнаружить увеличение электронов тепловыми фононами. Взаимодействия внеш. возбуждённых в М. акустич. волн с электронами проводимости приводит к возникновению тона либо разности потенциалов, пропорц. интенсивности потока фононов (см. *Акустоэлектрический эффект*). Теплопроводность сплавов ниже теплопроводности чистых М.

**Диамагнетизм и парамагнетизм М.** Электроны проводимости обладают как парамагнитными (из-за наличия у каждого электрона собств. магн. момента), так и диамагн. свойствами, обуслованными квантованием движения электронов в плоскости, перпендикулярной магн. полю (см. *Диамагнетизм*). В теории Друде — Лоренца — Зомерфельда (с эфф. массой  $m$  электрона вместо  $m_0$ ) магнитная восприимчивость электронного газа равна:

$$\chi = \frac{3}{2} \mu_B^2 \frac{n}{\epsilon_F} \left( 1 - \frac{m_0}{3m} \right); \quad kT \ll \epsilon_F, \quad \mu_B H \ll \epsilon_F \quad (7)$$

( $\mu_B$  — магнетон Бора). Из ф-лы (3) видно, что электронный газ в зависимости от соотношения между  $m$  и  $m_0$  может быть как диамагнитным, так и парамагнитным. Более строгое рассмотрение не изменяет этого вывода и оценки  $\mu_B$  по порядку величины, табл. 7.

Табл. 7.— Магнитная восприимчивость  $\chi$  полукристаллических металлов при  $T = 300$  К

Металл	Li	Be	Al	Sc	Cu	Nb	Sb	Au	Bi
$\chi \cdot 10^{-6}$	1,9	-1,8	1,6	17,5	-0,77	19,3	-5,3	-2,7	-13,0

В магн. восприимчивость М. вносят вклад и ионы: у переходных М. ионы диамагнитны, а у переходных, как правило, парамагнитны (см. *Магнетизм*). Из-за вырождения электронного газа ( $kT \ll \epsilon_F$ ) парамагн. восприимчивость электронного газа слабо зависит от  $T$  (см. *Паули парамагнетизм*). В сплавном магн. поле ( $\mu H > kT$ )  $\chi$  металлич. монокристаллов осциллирует как ф-ция  $1/H$  с частотами, пропорц. площадям экстремальных сечений поверхности Ферми (эффект де Хаазы — ван Алфвена, см. *Квантовые осцилляции в магнитном поле*).

Нек-рые М. при повышении  $T$  переходят в магнитоупорядоченное состояние: в ферромагнитное (напр., Fe, Co, Ni), в антиферромагнитное (Ce, Mn) или в состояние с геликоидальной магнитной атомной структурой (напр., Cr, табл. 1). При этом электроны проводимости играют существен. роль в формировании магн. структуры (см. *Ферромагнетизм, Антиферромагнетизм*). Упорядочение магн. моментов при понижении темп-ры — необязат. свойство осн. состояния М.; большинство переходных металлов остаются парамагнетиками или диамагнетиками вплоть до  $T = 0$  К.

Переход кристаллич. М. в сверхпроводящее состояние сопровождается изменением его магн. свойств: в сверхпроводящем состоянии М. в слабых полях проявляет себя как диамагнетик. Из-за *Мейснера эффекта* ср. значение магн. поля в сверхпроводнике равно 0. В сверхпроводниках 1-го рода (Sn, Pb, In и др.) это вы-

подняется вплоть до полей, разрушающих сверхпроводимость. В сверхпроводниках 2-го рода ( $Nb_3Sn$ ,  $NbTi$  и др.) в широком диапазоне  $H$  поле, не разрушая сверхпроводимости, проникает в объём в виде вихрей, что эффективно ослабляет диамагнетизм.

**Эмиссия электронов.** При нагревании  $M$ . до высоких темп-р наблюдается «испарение» электронов с поверхности  $M$ . (см. *Термоэлектронная эмиссия*). Число электронов, вылетающих из  $M$ . в единицу времени, пропорц.  $\exp(-W/kT)$ , где  $W$  — работа выхода электрона из  $M$ . Величина  $W$  (2—5 эВ) у разл.  $M$ . (и даже на равных кристаллич. гранях одного  $M$ .) различна;  $W$  зависит от состояния поверхности. Проложив к  $M$ . сильное электрич. поле ( $\sim 10^7$  В/см), можно существенно увеличить эмиссию электронов за счёт того, что электроны покидают  $M$ . в результате туннельного прохождения (см. *Автоэлектронная эмиссия*). Различия в  $W$  обуславливают *контактную разность потенциалов* между разными  $M$ .

**Гальваномагнитные и термомагнитные явления.** Магн. поле  $H$ , искривляя траекторию электронов в плоскости, перпендикулярной  $H$ , влияет на все кинетич. коэф. (эл.- и теплопроводностей, термоэлектрические и др.) и приводит к ряду новых явлений: к *Холла эффекту*, *магнетосопропусканию* и др. Различают классич. и квантовые (осцилляционные) гальваномагнитные явления. При рассмотрении последних надо учитывать квантование движения электронов проводимости в плоскости, перпендикулярной  $H$ . Для оценки классич. эффектов надо сравнить  $\text{ср.}$  радиус орбиты электрона в магн. поле  $r_H = (c/pv)H$  с длиной пробега  $l$ , а для оценки квантовых — расстояние между уровнями энергии ( $\Delta\epsilon = \hbar\omega_c = e\hbar H/mc$ ) с  $kT$  ( $\omega_c$  — *циклотронная частота*,  $m$  — эфф. масса в магн. поле; табл. 4). На зависимость кинетич. коэф. от  $H$  влияют особенности электронного энергетич. спектра  $M$ ., в частности то, какой формой (топологией) обладает поверхность Ферми (см. *Гальваномагнитные явления*, *Термогальваномагнитные явления*). Даже не слишком большое магн. поле при низких темп-рах ( $\sim 1$  К) может изменить кинетич. свойства  $M$ ., напр. в десятки тысяч раз увеличить поперечное (относительно  $H$ ) сопротивление ( $R$ ) или практически полностью «выключить» поперечную электронную теплопроводность  $M$ . (таким путём «выделяют» решётчону — фононную часть теплопроводности  $M$ .).

**$M$ . в перенормированном электромагнитном поле.** При прохождении переменного тока частоты  $\omega$  в  $M$ . наблюдается неоднородное распределение тока по образцу: ток сосредоточен вблизи поверхности образца на расстоянии порядка  $\delta = c/\sqrt{2\sigma\omega}$  (см. *Скин-эффект*). Для  $Si$  глубина скин-слоя  $\delta \approx 6 \cdot 10^{-4}$  см при  $\omega = 6 \cdot 10^8$  с $^{-1}$  ( $\sigma \approx 6 \cdot 10^8$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ ) (см. *Высокочастотная проводимость*).

При падении эл.-магн. волны на поверхность  $M$ . скин-эффект проявляется как в том, что эл.-магн. поле затухает на глубину  $\delta$ , так и в том, что оно почти полностью отражается от поверхности  $M$ .; коэф. отражения  $R \approx 1 - \sqrt{\omega/2\sigma} \approx 1$  (для  $Si$   $\sqrt{\omega/2\sigma} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ ).

Приведённые оценки справедливы в случае нормального скин-эффекта, когда  $\omega \ll 1$  и  $l \ll \delta$ . При  $T = 300$  К эти условия выполняются вплоть до оптич. частот ( $\tau \sim 10^{-13} - 10^{-14}$  с, а  $\delta \sim 10^{-8}$  см при  $\omega \sim 10^{14}$  с $^{-1}$ ). При низких темп-рах и для чистых образцов  $M$ . условие  $l \ll \delta$  часто не выполняется (даже если  $\omega \ll 1$ ). При этом имеет место аномальный скин-эффект. При  $k$ -ром  $\delta$  и  $R$  не зависят от  $l$ , и тем самым от  $T$ .

При низкой темп-ре  $M$ ., помещённый в достаточно сильное магн. поле ( $r_H \ll l$ ), обладает ии. свойствами, характерными для плазмы: в нём могут распространяться разнообразные слабозатухающие волны (геликоны, магнитолазменные волны, доплеровы и др.). Коэф.  $R$  «суперцелый» *циклотронный резонанс* (при равенстве частоты поля  $\omega$  целому кратному *циклотронной частоте*  $\omega_c = e\hbar/mc$ ) (см. *Плазма твёрдых тел*). В век-рях  $M$ .

(напр., в целочных) удаётся наблюдать *электронный парамагнитный резонанс* на электронах проводимости и *спиновые волны*.

**Оптические свойства.** Для эл.-магн. волн оптич. диапазона  $M$ ., как правило, непрозрачны. Характерный блеск — следствие практически полного отражения света с поверхности  $M$ ., обусловленного тем, что *диэлектрическая проницаемость* электронного газа  $\epsilon$  при оптич. частотах отрицательна. Диэлектрич. проницаемость  $M$ .  $\epsilon = \epsilon_0 - \omega_p^2/\omega^2$ , где  $\epsilon_0$  — диэлектрич. проницаемость ионного остова,  $\omega_p$  — плазменная (ленгмювская) частота электронов. Плазменные частоты могут быть экспериментально определены по характеристич. потерям энергии быстрых электронов (с энергией  $\gg \hbar\omega_p$ ) при прохождении через металл. плёнку. Они теряют энергию на возбуждение плазмонов — квантов колебаний электронной жидкости с частотой  $\omega_L$  (табл. 8).

Табл. 8. — Энергия плазмона  $\omega_L$  для некоторых металлов

Металл	Li	Na	K	Mg	Al
$\omega_L$ , эВ	7,12	5,71—5,85	3,72—3,87	10,6	15,3

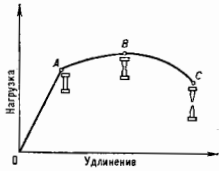
Наличием электронов проводимости обусловлено также экранирование в  $M$ . зарядов (напр., заряженных примесей) на характерном расстоянии  $r_D = v_{\text{эф}}/\omega_L$  ( $v_{\text{эф}}$  — *дрейфовая скорость* в  $M$  при  $U \ll v_{\text{эф}}$ ), имеющем атомный масштаб. При взаимодействии света с электронами  $M$ . важную роль играет т. в. внутр. фотоэффект, т. е. выужденные (за счёт поглощения фотонов) переходы электронов из зоны в зону. Как правило, именно внутр. фотоэффект определяет коэф. поглощения излучения видимого и УФ-диапазонов и изменение проводимости  $M$ . под воздействием света (см. *Фотопроводимость*). Чем выше  $\omega$ , тем меньшую роль во взаимодействии света с  $M$ . играют электроны проводимости: для УФ-и рентг. диапазонов  $M$ . мало отличается от диэлектрика. Отражение плоскополяризов. света от поверхности  $M$ . сопровождается поворотом плоскости поляризации и появлением эллиптич. поляризации. Это явление используется для техн. целей и для определения оптич. констант  $M$ . (см. *Металлооптика*, *Отражение света*, *Поляризация света*).

Лит.: Крэнкелл А., Квей Чонг Уонг, Поверхность Ферми, пер. с англ., М., 1978; Абрикосов А. А., Основы теории металлов, М., 1987.

**Механические свойства.** Многие  $M$ . и сплавы обладают одновременно высокой механич. прочностью и высокой пластичностью, что обуславливает их широкое применение в качестве конструкт. материалов. Изменение линейных размеров  $M$ . в результате пластич. деформации при  $T = 300$  К достигает десятков, а иногда сотен % (сверхпластичность).

Механич. свойства исследуют, измеряя зависимость механич. напряжения — деформации (рис. 8). Изменённые формы образца в процессе деформации показано для трёх характерных участков диаграммы. Участок  $OA$  соответствует прямой пропорциональности между нагрузкой и удлинением и обратности деформации (упругая область; см. *Закон Гука*). На целойном участке  $AB$  нагрузка продолжает увеличиваться с меньшей скоростью, деформация необратима, но распределена равномерно по длине образца. На участке  $BC$  нагрузка уменьшается вследствие локального уменьшения поперечного сечения образца в его центр. части.

Рис. 8. Деформация при растяжении металлического цилиндра. Образование «шейки» ха-





ные фазовые переходы) и при достижении магн. полем критич. значения  $H_c$  вещество переходит непосредственно из антиферромагн. состояния в «свободоферромагнитное» (или, что то же самое, в насыщенное парамагн. состояние) без промежуточной угловой (спин-флип) фазы. Различают веск. классов М.

Особенностью двух классов М. является присущая им очень большая энергия анизотропии, так что у них эфф. поле *магнитной анизотропии*  $H_A$  больше эфф. поля обменного взаимодействия  $H_E$ . Фазовая диаграмма для М. 1-го класса на плоскости  $H-T$  представлена на рис. 1, а. При низких темп-рах  $T$  при достижении



рис. 1.

поля  $H_c$  магн. момент подрешётки, направленный навстречу приложенному полю, скачком поворачивается на  $180^\circ$  и намагниченности обеих подрешёток устанавливаются параллельно друг другу (см. *Магнитная подрешётка*). Простейшим объяснением такого перехода является выдвинутое Л. Д. Ландау модель конкурирующих взаимодействий, согласно к-рой внутривещное обменное взаимодействие является много больше межподрешёточного. Следует отметить, что при конечных размерах образца имеющейся размагничивающее поле приводит к возникновению «смешанной фазы» (рис. 1, б), в к-рой чередуются слои антиферромагн. и ферромагн. фаз. При темп-рах выше трикритической  $T_{TC}$  (рис. 1, а) магн. восприимчивость образца  $\chi$ , вдоль приложенного поля отлична от нуля и намагниченность подрешётки, направленной навстречу приложенному полю, плавно меняется от величины  $-M$  до величины  $+M$ , равной намагниченности второй подрешётки в приложенном поле. В этот момент происходит переход 2-го рода из антиферромагнетика в парамагнетик. Характерными представителями этого (1-го) класса М. являются слоистые антиферромагнетики  $FeCl_2$ ,  $FeBr_2$ ,  $FeI_2$ , изинговские антиферромагнетики типа  $DyPO_4$ ,  $FeCO_3$ ,  $Dy_2Al_2O_{12}$  и мн. др.

Ко 2-му классу М. относят вещества, в к-рых переворот векторов намагниченности подрешёток происходит в два этапа. В основном это квазиодномерные антиферромагнетики, в к-рых имеется ферромагн. взаимодействие в линейных цепочках, а намагниченность направлена перпендикулярно этим цепочкам. При низких темп-рах у них наблюдаются два критич. поля. С достижением 1-го критич. поля в одной из каждой трёх цепочек с намагниченностью, антипараллельной полю, происходит опрокидывание намагниченности — фазовый переход 1-го рода из двухподрешёточного антиферромагнетика в шестиподрешёточный ферромагнетик, как это схематически показано на рис. 2. При достижении 2-го критич. поля намагниченности всех подрешёток поворачиваются параллельно полю и вещество переходит в насыщенное парамагн. состояние. Представителями этого класса М. являются моноклинные гидратированные соли типа  $FeCl_2 \cdot 2H_2O$ , орторомбич. кристалл  $CsCoCl_3 \cdot 2H_2O$  и ряд др. соединений.

Следует отметить общую для большинства рассмотренных М. особенность: критич. поля  $H_c$  оказываются сравнительно малыми — от единиц до десятков килоэрстед ( $\mu H_c \ll K T_c$ ). Это легко объясняется моделью конкурирующих взаимодействий.

3-й, гипотетический, класс М. может осуществиться в антиферромагнетиках, в к-рых  $\chi_0 > \chi_1$  ( $\chi_1$  — восприимчивость поперёк оси антиферромагнетизма). В этом случае в любом магн. поле, параллельном оси антиферромагнетизма, намагниченности подрешёток остаются коллинеарными, и возможен фазовый переход 2-го рода из антиферромагн. в парамагн. состояние.



рис. 2.

Лит.: Лан и да у Л. Д., Возможное объяснение зависимости восприимчивости от поля при низких температурах, Собр. трудов, т. 1, М., 1969; S tr u j e w s k i E., G i o r d a n o N., Metamagnetism, «Adv. Phys.», 1977, v. 26, p. 487; см. также лит. при ст. Антиферромагнетизм.

А. С. Борокин-Романов.

**МЕТАСТАБИЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ** — состояние неполного равновесия макроскопич. системы, соответствующее одному из минимумов термодинамич. потенциала системы при заданных внеш. условиях. Устойчивому (стабильному) состоянию отвечает самый глубокий минимум. Однородная система в М. с. удовлетворяет условиям устойчивости *равновесия термодинамического*  $C_p > C_V > 0$ ,  $(\partial P / \partial V)_T < 0$  относительно малых возмущений фаз. параметров (энтропии, плотности и др.). При достаточно больших возмущениях система переходит в абсолютно устойчивое состояние.

Большой класс М. с. связан с *фазовыми переходами* 1-го рода (кристалл  $\rightleftharpoons$  жидкость  $\rightleftharpoons$  газ). Для одноконтинуальной системы *Гиббса энергия*  $\Phi(T, P)$  (или хим. потенциал  $\mu(T, P) = \Phi/N$ ,  $N$  — число частиц в системе) изображается поверхностью с самопересечением. На линии пересечения хим. потенциалов двух фаз  $\mu'(T, P) = \mu''(T, P)$  возможно равновесное сосуществование фаз. Точка  $s$  на рис. 1 — след такой линии на

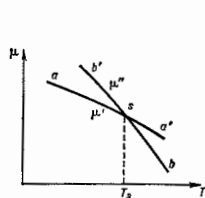


рис. 1. Сечение диаграммы состояний  $P = \text{const}$ ;  $s$  — точка равновесия двух фаз

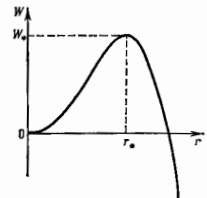


рис. 2. Зависимость работы  $W$ , необходимой для образования зародыща, от его радиуса  $r$ .

плоскости  $P = \text{const}$ , М. с. двух фаз соответствует участку  $sa'$  и  $sb'$ . М. с. характеризуется конечным временем жизни. При отсутствии конкурирующей (более устойчивой) фазы распад М. с. начинается с возникновения жизнеспособных зародышей в результате флуктуаций, напр. капельки жидкости в пересыщенном паре или пузырьков пара в перегретой жидкости (см. *Переохлаждение*, *Перегрев*).

Мин. работа  $W$ , к-рую нужно затратить для создания зародыща радиуса  $r$ , состоит из объёмного и поверхностного вкладов. Зависимость  $W$  от  $r$  показана на рис. 2. Положение максимума  $r = r_*$ ,  $W = W_*$  определяет размер критич. зародыща. С ростом пересыщения значения  $r_*$  и  $W_*$  убывают. При  $r > r_*$  термодинамически обусловлен рост зародыща. Для сферич. зародышей  $W_* = 16\pi\sigma^3 / 3(P - P_*)^2$ , где  $\sigma$  — коэф. поверхностного натяжения на границе фаз,  $P_*$  — давления в критич. зародыше и во внеш. фазе. Вместо разности давлений можно ввести величину переохлаждения (перегрева)

[Т — Т] при заданном давлении или разности хим. потенциалов  $\Delta\mu$  метастабильной и стабильной фаз.  $W_0 = 16\pi\sigma^2/3(\Delta\mu)^3$ ,  $v$  — удельный объём стабильной фазы.

В большинстве реальных ситуаций распад М. с. происходит до достижения заметной скорости гомогенного зародышеобразования в явлении, к-рому относится теория. Начало фазового перехода облегчается влиянием стенок и присутствием в объёме системы разл. включений, существенно снижающих работу образования жизнеспособных зародышей устойчивой фазы. В этом случае говорят о гетерогенном зародышеобразовании. Специально поставленные опыты с перегретыми и переохлаждёнными жидкостями приводят к результатам, к-рые согласуются с предсказаниями теории флуктуат. (гомогенного) зародышеобразования. В опытах альтернативной медленному изменению состояния в «чистой» системе служит режим быстрого создания такого пересечения, при к-ром осн. доля фазового перехода обусловлена массой флуктуат. зародышей, а вклад гетерогенного зародышеобразования незначителен.

Две фазы, метастабильные по отношению к третьей фазе, могут сосуществовать друг с другом. При этом удовлетворяются обычные условия равновесия фаз:  $T = T^*$ ,  $P = P^*$ ,  $\mu = \mu^*$ . Примером является переохлаждённая жидкость и пар над ней при  $T < T^*$ , где  $T^*$  — темп-ра тройной точки кристалл — жидкость — пар. Др. пример — равновесие кристалл — жидкость на продолжении линии плавления за тройную точку, т. е. при  $P < P^*$ . Аналогичный приём построения расширенных диаграмм состояния используют для систем с полиморфными превращениями (см. *Полиморфизм*). Это связано с тем, что мн. кристаллич. материалы получают на основе метастабильных модификаций. Большое практич. значение имело построение фазовой диаграммы графит — алмаз. В двух- и многокомпонентных системах нужно учитывать возможность метастабильности, вызванной концентрац. пересечением.

М. с. — неравновесное состояние термодинамич. системы. Для определённости обычно предполагают, что система, находящаяся в М. с., прорелаксировала по всем признакам, кроме тех флуктуат. мод, к-рые приводят к возникновению жизнеспособных зародышей. Иначе говоря, характерное время ожидания распада М. с. больше остальных времён релаксации (температурной, концентрационной и т. д.). В этом случае существует квазиустойчив. продолжение термодинамич. свойств равновесной системы в область М. с. При несоблюдении сформулиров. условия метастабильности и неравновесности фаз связан более сложным образом. Напр., застеклованная (очень вязкая) жидкость метастабильна (при  $T < T_{пл}$ ), но её структура и свойства зависят от предистории системы (см. *Стеклообразное состояние*).

С существованием М. с. связаны явления гистерезиса при фазовых переходах, напр. при циклич. перемагничивании ферромагнетиков, в камерах Вильсона, в цуарьковых камерах. Мн. технич.ские важные материалы, в т. ч. стали, алюминиевые сплавы, являются метастабильными системами.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Статистическая физика, ч. 1, 3 изд., М., 1976, § 21, 83, 162; Скрипов В. П., *Метастабильная жидкость*, М., 1972; Сивухин Д. В., *Общий курс физики*, 3 изд., т. 2, М., 1978; Френкель И. И., *Кинетическая теория жидкостей*, Л., 1975.

В. П. Скрипов.

**МЕТАСТАБИЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ** в квантовых системах — состояние с временем жизни (т), много большим характерного времени жизни возбуждённых состояний ( $\sim 10^{-8}$  с) атомной системы. Обычно метастабильными считают возбуждённые состояния, излучательные (радиационные), переходы из к-рых в др. состояния запрещены строгими *отбора правилами*. М. с. отличаются типом переходов, к-рые для них возможны: магн. дипольный, электрич. квадрупольный, двухфотонный (см. *Многофотонные процессы*) и др. переходы.

М. с. для к-рых возможны магн. дипольные переходы, обычно представляет собой возбуждённую компоненту тонкой или сверхтонкой структуры осн. состояния. Классич. примером являются состояние, соответствующее компоненте сверхтонкой структуры уровня  $1S_{1/2}$  атома Н с полным моментом  $J = 1$  и  $\tau = 3,5 \cdot 10^4$  нс. Радиация 21 см, возникающая при переходе из этого состояния, играет фундам. роль в совр. *радиоастрономии* и *оптических стандартах частоты*.

Типичные М. с. для к-рых возможны электрич. квадрупольные квантовые переходы, — возбуждённые состояния  $1S$  и  $1D$  в конфигурациях  $n^2$  и  $n^1$ , а также  $3P$  и  $3D$  в конфигурации  $n^3$ . Спектральные линии, соответствующие переходам из этих состояний, наблюдаются в планетарных туманностях и используются для диагностики электронной плотности и темп-ры в них.

М. с. для к-рых возможны двухфотонные переходы, — возбуждённые состояния, однофотонный переход из них в нижележащие состояния запрещён. Напр., уровни  $2s$  в атоме Н и водородоподобных ионах,  $1s^2 2s^2 S_0$  в He и гелийподобных ионах.

Одни из самых долгоживущих М. с. — состояние  $1s^2 2s^2 S_0$  в He и гелийподобных ионах электрич. дипольные и электрич. квадрупольные переходы из них строго запрещены, а магн. дипольные и двухфотонные переходы сильно подавлены. Наиб. вероятен релятивистский магн. дипольный переход. Для He радиаци. время жизни в этом состоянии  $\tau = 5800$  с и быстро уменьшается с ростом кратности иона [ $\tau$  (ArXVII) = 170 нс]. Спектральные линии, соответствующие переходам из этих состояний, используются для диагностики электронной плотности в солнечной короне. М. с.  $1s^2 2s^2 S_0$  и  $1s^2 2s^2 S_1$  He играют важную роль в создании инверсии населённостей в He — Ne — лазере и лазерах на парах металлов. М. Р. Ашеч.

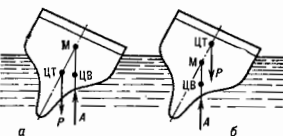
Для молекул возможны вращат. и колебат. М. с. Однако времена жизни таких состояний в условиях, обычно достигаемых в лаборатории, значительно превосходят времени вращат. и колебат. релаксации молекул, поэтому переход из возбуждённых М. с. происходит при столкновении молекул. В то же время в сверхразреженной межзвёздной среде, где времена свободного пробега молекул иногда достигают неск. лет, молекулы в М. с. живут долго. В частности, вращат. уровни энергии  $K = J$  осн. колебат. состояния молекул типа симметричного вольчка (напр., аммиак), вследствие правила отбора  $\Delta K = 0$  являются М. с. В результате центростремительного искривления молекулы при вращении для переходов с  $\Delta K = \pm 3$  (группа  $C_{3v}$  или  $D_{3h}$ ) запрет ослабляется. Времена жизни таких М. с. составляют от неск. часов до неск. лет. Если молекула имеет центр инверсии (напр.,  $CO_2$ ), то все вращат. уровни и первый возбуждённый колебат.  $g$ -уровень (если ниже нет  $u$ -уровня) являются М. с., т. к. из таких состояний возможны только квадрупольные переходы или переходы более высокой мультипольности. Для изучения межзвёздной среды представляет интерес М. с. полновсесимметричного колебания  $\nu$  иона  $N$ . В этом случае из состояний  $\nu_1$  возможны переходы: 1)  $\nu_1 \rightarrow \nu_2$  (где  $\nu_2$  — активное колебание) — вследствие ангармонизма; 2)  $\nu_1 \rightarrow (\nu - 1)\nu_1$  — вследствие колебательно-вращат. взаимодействия, 3) квадрупольные переходы.

М. Р. Ашеч.

**МЕТАЦЕНТР** — точка, от положения к-рой зависит устойчивое равновесие (остойчивость) плавающего тела. При равновесии на плавающее тело кроме силы тяжести  $P$ , приложенной в центре тяжести (ЦТ) тела (рис.), действует ещё выталкивающая (архимедова) сила  $A$ , линия действия к-рой проходит через т. н. центр водоизмещения — ЦВ (центр тяжести массы жидкости в объёме погружённой части тела наа. также центром величины). В наиб. важном для практики случае, когда плавающее тело имеет продольную плоскость симметрии, точка пересечения этой плоскости с линией дейст-

вия выталкивающей силы и наз. М. При наклонах тела положение М. меняется. Плавающее тело будет остойчивым, если самый низкий из М. (иногда только его и

Положение центра М. при устойчивом (а) и неустойчивом (б) равновесии плавающего тела.



наз. М.) будет лежать выше центра тяжести тела. Расстояние между М. и центром тяжести плавающего тела наз. метастатическое выстой и служит мерой остойчивости судна.

**МЕТАЛЛАСЫ** — то же, что **металлические стёкла**.  
**МЕТЕОРИТЫ** (от греч. *метеора* — небесные явления) — тела, упавшие на поверхность Земли из межпланетного пространства; представляют собой остатки метеорных тел, не разрушившихся полностью при движении в земной атмосфере. При втормлении в атмосфере с космич. скоростью (15—20 км/с) метеорное тело в результате трения о воздух сильно нагревается и начинает ярко светиться (явление болида). В атмосфере метеорные тела тормозятся и разрушаются в результате дробления и абляции — расплавления, разрывания и частичного испарения вещества. Поверхность найденных на Земле М. имеет характерные вмятины (регмагитты) и покрыта окисной плёнкой — корой плавления. Если крупное метеорное тело достигнет поверхности Земли с высокой скоростью (св. 3—4 км/с), то происходит взрыв М. и выброс грунта с образованием кратера. На земном шаре известно свыше сотни структур (кратеров) метеоритного происхождения от 0,2 до 100 км поперечником. На мн. телах Солнечной системы, фактически не имеющих атмосферы (Луна, Меркурий, ряд спутников планет), поверхность испещрена метеоритными кратерами.

По совр. представлениям, М. являются обломками родительских тел — *астероидов*, орбиты к-рых пересекают орбиту Марса. Вычисленные орбиты ряда М., падение к-рых было сфотографировано, показали, что афелии метеоритных орбит находятся в области пояса астероидов. Предполагается, что несколько М. трёх редких типов являются осколками пород марсианской поверхности, а 9 найденных в Антарктиде М. — куски лунного грунта (реголита).

Исследование вещества М. позволяет сделать ряд выводов об эволюции Солнечной системы. Данные анализа изотопного, хим. и минерального состава М., а также структуры М. показали, что метеоритное вещество представляет собой изменения со времени своего образования из протопланетной материи, но вместе с тем сохранило ряд особенностей, отражающих разл. этапы эволюции Солнечной системы. Это установлено по определению возраста М. — датировке событий, повлиявших на физ.-хим. свойства метеоритного вещества.

Одной из характеристик М. является временной интервал образования метеоритного вещества — время между моментом прекращения поступления новых элементов в протопланетное газово-пылевое облако и моментом остывания родительских тел метеоритов до тех пор, когда эти тела становятся способными удерживать газы — продукты распада короткоживущих радиоактивных изотопов. Временной интервал образования тел Солнечной системы из протопланетного облака, вычисленный по реакциям радиоакт. распада  $^{129}\text{I} \rightarrow ^{129}\text{Xe}$  и  $^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{136}\text{Xe}$  (по кол-ву исходных и конечных продуктов распада в М.), 50—200 млн. лет (рис. 1).

Др. характеристика М. — время, протекающее от начала хим. фракционирования метеоритного вещества в родительских телах (фракционирование привело к из-

менению относительного обилия элементов: Rb/Sr, U/Pb и др.). Этот возраст составляет 4,5—4,6 млрд. лет, он определен по реакциям распада  $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$  и  $^{237}\text{Pu} \rightarrow ^{209}\text{Pb}$  (см. *Космохронология*). С этой величиной согласуется макс. возраст газодержания — время, протекающее с момента остывания вещества М. ниже темп., когда могли начать накапливаться радиогенные инертные газы. Определение этого возраста по реакциям  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$  и U, Th  $\rightarrow ^4\text{He}$  не даёт значения 3,5—4,5 млрд. лет. Нек-рые М. имеют значительно меньшее время газодержания (ок. 0,6 млрд. лет), что можно объяснить полной потерей газов ( $^{40}\text{Ar}$  и  $^4\text{He}$ ) в момент катастрофич. столкновения в космич. пространстве их родительских тел, приведшего к сильному разогреву в-ва.



Рис. 1. Кривая распада радиоактивного изотопа  $^{147}\text{Sm}$  в Солнечной системе. Участок I — поступление в протопланетное облако новых ядер  $^{147}\text{Sm}$ ; II — прекращение добавки новых ядер; III — образование тел Солнечной системы; планеты разогреваются,  $^{147}\text{Sm}$  распадается с образованием  $^{143}\text{Nd}$ , который улетучивается из горячих планет; IV — остывание планеты стали удерживать радиогенные газы. Задавая А и В (количество удержанного  $^{143}\text{Nd}$ ), можно вычислить интервал С.

Рассматривая такие радиоакт. (космич.) возраст М. — время накопления в М. продуктов ядерных реакций его вещества с *космическими лучами*. Такой процесс может происходить лишь после дробления родительских тел, создающего условия для прямого воздействия космич. лучей на вещество М. Рядом, возрасты М. разных типов, определённые по космогенным изотопам ( $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и др.), от неск. млн. до сотен млн. лет.

По составу М. разделяют на три осн. класса: каменные, железокремнистые и железные. По числу падений каменные М. составляют 93,3%, железокремнистые — 1,3%, железные — 5,4% (одновременно выпадение неск. осколков одного М. рассматривается как одно падение). Эти классы подразделяются на группы и типы по хим. (минеральному) составу и структуре. Наиб. многочисленными среди каменных М. являются хондриты, в них присутствуют мелкие (до 1—2 мм) силикатные шарики — хондры. Остальные каменные М. хондр не содержат и наз. ахондриты. По количественному отношению ряда хим. элементов (Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Fe/Si, C/Si, S/Si и др.) хондриты и ахондриты, в свою очередь, подразделяются на группы и отд. типы, отвечающие, вероятно, различным по составу родительским телам. Среди хондритов выделяют группу углистых хондритов (4 осн. типов — CI, CM, CV и CO), отличающихся большим содержанием летучих элементов, в т. ч. C, S, и воды (кол-во летучих элементов убывает от типа CI к типам CV и CO). Относит. содержание элементов в углистых хондритах типа CI наиб. близко к распространённости элементов в солнечной фотосфере (за исключением водорода и инертных газов), что видно из графика (рис. 2). Учитывая погрешности в определении распространённости нек-рых элементов на Солнце, а также определ. различия между составом Солнца и протосолнечной туманности, предполагают, что совр. данные о распространённости элементов в углистых хондритах CI соответствуют составу первичного вещества Солнечной системы (с точностью до 10%). Исключение составляют лишь Vg, I, V и Eп, содержание к-рых в М. этого типа изменилось в результате разл. процессов хим. фракционирования. Ряд различий в составе хондритов др. типов свидетельствует о хим. фракционировании метеоритного вещества при его конденсации в протопланетном облаке. К типичным для хондритов минералов относятся железомagnesиальные сили-



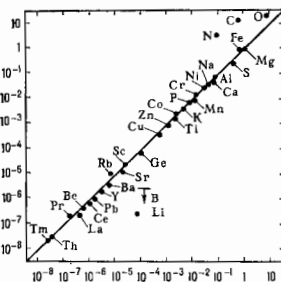


Рис. 2. Относительная распространенность атомов в солнечной фотосфере и в углистых хондритах типа CI (распространенность  $Si = 1$ ).

каты, а также плаггиоклазы, никелистое железо и сульфид железа. В нек-рых углистых хондритах обнаружены межзвездные микроскопич. зерна алмаза и карбида кремния, захваченные протопланетным облаком. В отличие от хондритов, вещество к-рых не было существенно автронто хим. дифференциацией в недрах родительских тел, ахондриты и др. классы М. представляют собой дифференцированный материал. Продуктом этой дифференциации являются, в частности, железные М., состоящие из никелистого железа с включением др. минералов. Высокое содержание Ni в этих М., как и в металлах включенных хондритов (5% Ni и выше), объясняется тем, что Ni целиком концентрируется в металлической фазе и его миним. содержание (при полном восстановлении Fe) определяется отношением космич. распространенности элементов: Ni/Fe  $\approx 1/20$  (по числу атомов). Для железных М. характерна крупнокристаллич. структура, свидетельствующая о чрезвычайно медленном остывании сплава Fe — Ni. Согласно расчтам, скорость остывания никелистого железа в М. составляла ок. 1—100 °C за 1 млн. лет. Если считать, что вещество железных метеоритов находилось внутри родительских тел с силикатной оболочкой, то эти тела по размерам должны были быть близки к астероидам (ок. 200—300 км поперечником).

Лит.: Кривов Е. Л., Основы метеоритики, М., 1955; Вуд Д. ж., Метеориты и происхождение Солнечной системы, пер. с англ., М., 1971; Дьяконова М. И., Харитонов В. И., Янелъ А. А., Химический состав метеоритов, М., 1970; Метеоритные структуры на поверхности планет, Сб. ст., М., 1979; Anders E., Ebihara G. M., Solar-system abundances of the elements, «Göschim. and Cosmochim. Acta», 1982, т. 46, р. 2363; Додд Р. Т., Метеориты, пер. с англ., М., 1986.

**МЕТЕОРНАЯ РАДИОСВЯЗЬ** — вид радиосвязи, при к-рой используются рассеяние радиоволн метеорными следами. М. р. применяют для передачи гл. обр. цифровой информации и для сверки территориально разнесенных устройств точного времени. Метеорные частицы с космич. скоростями вторгаются в атмосферу и ионизируются на высотах 80—100 км. Испарившиеся молекулы метеорной частицы концентрируются при соударениях с молекулами воздуха, образуя протяженные (цилиндрич. формы) след электронно-ионной плазмы (диам.  $\sim 1$  м, длина  $\sim 40$  км), способный эффективно рассеивать радиоволны метрового и декаметрового диапазонов. Из-за большой вытянутости этих образований энергии рассеянных на них радиоволн сосредоточена вблизи нуклуса, определяемого условием зеркальности рассеяния по отношению к оси цилиндра. По мере диффузии следа уменьшается его плотность и увеличиваются размеры, что приводит к уменьшению амплитуды рассеянного сигнала. Метеорные следы позволяют осуществить М. р. при помощи передатчиков с мощностью  $\sim 1$  кВт и антенн

с усилением 6—18 дБ на расстоянии до 2000 км без ретрансляции. Число принимаемых «отражений» в единицу времени (от подходящих образом ориентированных метеорных следов) зависит от мощности передатчиков и чувствительности приёмных устройств и увеличивается с ростом длины волны; напр., на частоте  $\sim 400$  МГц при мощности передатчика  $\sim 1$  кВт и полосе пропускания  $\sim 10$  кГц это составляет неск. единиц в 1 минуту. Время существования рассеянных сигналов меняется от 0,1 до 10 с, с преобладанием кратковрем. «отражений». Применяемая скорость передачи 5—10 тыс. двоичных единиц в 1 с, можно в течение этих коротких интервалов времени (составляющих неск. % от общего времени связи) передать такой объём информации, к-рый обеспечивает устойчивую работу одного или неск. телеграфных аппаратов. Вследствие слабого поглощения метрволн в ионосфере М. р. значительно меньше подвержена влиянию ионосферных возмущений, чем радиосвязь в декаметровых волнах. М. р. обладает высокой направленностью (даже при слабонаправленных антеннах) и потому меньше подвержена действию помех от удалённых радиостроений. При М. р. рассеянные сигналы мало искажаются, обладают высокой фазовой стабильностью и взаимностью условий распространения в прямом и обратном направлениях. Всё это обеспечивает большую эффективность использования М. р. для приёма ил.к. времени в разнесенных устройствах. Прерывистый характер образования канала связи требует предварит. накопления информации и передачи её порциями с большой скоростью в периоды прохождения сигналов (принятые порции требуется накопить и с обычной скоростью передать в регистрирующий аппарат). Кроме накопителей, аппаратура М. р. содержит анализатор пригодности принятых сигналов для передачи информации и систему сопряжения порций принятых сигналов, исключающую потерю или повторный приём на стыках между порциями. Для обеспечения достоверности передачи применяют методы автоматич. обнаружения и исправления ошибок. Кратковременность сеансов связи, а также направленность М. р., характерная для каждого сеанса, позволяют строить системы М. р., использующие обычную рабочую частоту для связи с большим числом корреспондентов. В этом случае М. р. осуществляется поочерёдно в порядке появления метеорных следов, ориентированных подходящим образом для отд. пунктов.

Лит. см. при ст. Распространение радиоволн. В. В. Сидорова.

**МЕТР** — единица длины, осн. единица СИ. До 1960 международный эталон М. — длина между двумя штрихами на платино-иридиевом бруске, хранящемся в Международном бюро мер и весов в Севре (Франция). В 1960 11-я Генеральная конференция по мерам и весам приняла др. определение М.: длина, равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями  $2p_{10}$  и  $5d_5$  атома  $^{85}Kr$ . В 1983 17-я Генеральная конференция по мерам и весам приняла определение М. как расстояния, проходящего в вакууме плоской эл.-магн. волной за  $1/299792458$  дол. секунды. Точность нового эталона М.  $\sim 10^8$ — $10^9$  (относит. погрешность  $\sim 10^{-8}$ — $10^{-9}$ ).

Лит.: Стодк и в Л. Р., Физические величины и их единицы, М., 1984.

**МЕТРИКА** — обобщение понятия расстояния между точками евклидова пространства на множества, в к-рых можно ввести М. (метрич. пространство). Для точек  $x, y$  такого пространства М.  $\rho(x, y)$  — это вещественная неотрицат. ф-ция, удовлетворяющая условиям: 1)  $\rho(x, y) = 0$  лишь при  $x = y$ ; 2)  $\rho(x, y) = \rho(y, x)$ ; 3)  $\rho(x, z) + \rho(y, z) \geq \rho(x, z)$ . Вид М. зависит как от самого пространства, так и от выбора системы координат в нём. Простейший пример М. — расстояние  $\left[ \sum_{i=1}^n (x_i^2 - y_i^2)^2 \right]^{1/2}$

в декартовых координатах евклидова пространства. М. евклидова пространства в *криволинейных координатах*

и *М. риманова пространства* определяют метрические тензоры. *М. эльбертова пространства* задаётся его нормой (или скалярным произведением). Понятие *М.* применяется и в тех случаях, когда не все условия 1—3 выполнены: напр., если  $\rho(x, y) = 0$  не только при  $x = y$ , то раз. п. в с в д о м е т р и к о й. Если *М.* не является положительной определённой, то её наз. *инdefинитной метрикой*; физ. примером такой системы служит *М. пространства Минковского в относительности теории*.

**МЕТРИКА ИНДЕФИНИТНАЯ** — см. *Инdefинитная метрика*.

**МЕТРИКА ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ** — основная геом. структура, к-рой наделяется пространственно-временное многообразие в специальной и общей теории относительности; определяется заданием поля симметричного ковариантного тензора 2-го ранга с отличным от нуля определителем — метрического тензора.

Метрич. тензор в спец. теории относительности имеет вид  $\eta_{\alpha\beta} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$  (псевдоевклидова метрика сигнатуры — 2); пространственно-временное многообразие с такой метрикой наз. *пространством Минковского*. В общей теории относительности вводится метрич. тензор  $g_{\mu\nu}(x)$  более общего вида, удовлетворяющий, однако, требованию, чтобы в достаточно малой окрестности любой заданной пространственно-временной точки *x* спец. выбором координат  $g_{\mu\nu}(x)$  можно было свести к  $\eta_{\alpha\beta}$ ; такое пространственно-время (п. в.) является псевдоримановым пространством сигнатуры — 2.

*М. п. в.* задаёт квадрат *интервала* — «расстояния» между событиями, с к-рыми сопоставляются точки п. в.:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu.$$

При преобразованиях пространственно-временных координат метрич. тензор, вообще говоря, изменяется (такие преобразования включают и переход к произвольно движущейся в каждой точке системе отсчёта) так, чтобы величина  $ds^2$  оставалась инвариантной. Существует, однако, преобразования, оставляющие метрич. тензор форм-инвариантным (преобразования изотетрии), они выражают собой геом. симметрии п. в., обусловленные физ. содержанием теории. Так, метрич. тензор п. в. Минковского в спец. теории относительности не изменяется при преобразованиях координат из группы Пуанкаре, включающих переносы начала отсчёта пространственных координат и времени, повороты пространственных осей и *Лоренца преобразования*. Поскольку последние интерпретируются как описывающие переход от одной инерц. системы отсчёта к другой, инвариантность метрики п. в. Минковского означает, что ур-ния, записанные в лоренц-ковариантной форме, будут автоматически удовлетворять *относительности принципу Эйнштейна*.

В общей теории относительности существование преобразований, не изменяющих *М. п. в.*, возможно лишь при наличии соответствующих симметрий гравитач. поля. Так, метрич. тензор п. в. Шварцшильда инвариантен относительно пространственных поворотов и временных сдвигов, что отражает центр. характер гравитач. поля и его статичность; структура метрич. тензора в моделях Фридмана, описывающих крупномасштабную структуру п. в. Вселенной в целом, отражает факт однородности и изотропии Вселенной в больших масштабах (см. *Тяготение*). Если нек-рое преобразование изотетрии порождается векторным полем, то такое векторное поле наз. полем Киллинга (W. Killing, 1892) и удовлетворяет ур-нию  $\xi_{\mu;\nu} + \xi_{\nu;\mu} = 0$ , где точкой с запятой обозначена ковариантная производная, согласованная с метрикой.

Следует иметь в виду, что *М. п. в.* отражает не только характер гравитач. поля, но и выбор системы координат в п. в. (системы отсчёта). Так, переход к криволинейным координатам в п. в. Минковского (к ускоренной си-

стеме отсчёта) приводит к метрич. тензору общего вида, однако собственно гравитач. поля в этом случае нет. Истинное гравитач. поле связано с тензором кривизны Римана — Кристоффеля, к-рый равен нулю в плоском п. в. в любой системе отсчёта.

*М. п. в.* в случае слабого гравитач. поля непосредственно связана с ньютоновскими гравитач. потенциалом  $\Phi$ , а именно:  $g_{\mu\nu} \approx \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ , где  $h_{\mu\nu}$  малые добавки, характеризующие отклонение метрики от плоской, причём  $h_{00} = 2\Phi/c^2$ .

Помимо задания расстояний в пространстве-времени, *М. п. в.* служит для определения «длина» 4-векторов  $A$ ,  $\sqrt{A^2} = \sqrt{A^\alpha A^\beta g_{\alpha\beta}}$ , а также позволяет ввести операции поднятия и опускания индексов у векторов и тензоров. Определитель метрич. тензора задаёт инвариантный элемент объёма в п. в.:  $d\Omega = \sqrt{-g} dx^4$ , где  $g$  — определитель метрич. тензора.

Лит. см. при ст. *Относительности теории*, *Тяготение*. Д. В. Гладков.

**МЕТРИЧЕСКАЯ НЕРАЗЛОЖИМОСТЬ** — матем. формулировка свойства *эргодичности*, к-рая используется для доказательства равенства средних по времени средних статистических в равновесной *статистической физике*. *М. н.* предполагает невозможность разложения произвольной *динамической системы* на эргодич. компоненты. В применении к траекториям изолиров. механич. системы из  $N$  частиц в фазовом пространстве  $6N$  измерений *М. н.* предполагает, что траектории плотно заывают поверхность пост. энергии, но не могут, как предполагал Г. Больцман (L. Boltzmann), проходить с течением времени через все точки этой поверхности. Такое определение эргодичности (см. *Эргодическая гипотеза*) приводило бы к противоречию из-за отсутствия самопересечения фазовых траекторий. Доказательство эргодич. теоремы в квантовой механике дано Дж. Нейманом (J. Neumann) [1], в классич. статистич. механике — Э. Хопфом (E. Hopf) [2] и Н. Н. Боголюбовым [3], обзор разл. применений [М. н.] не только к статистич. механике, но и к др. задачам теории вероятности см. в [4].

Лит.: 1) Нейман И., Математические основы квантовой механики, пер. с нем., М., 1964, с. 324—87; 2) Хо п ф Э., Эргодическая теория, пер. с нем., «Успехи матем. науки», 1949, т. 4, в. 1, с. 113—32; 3) Б о г о л у б о в Н. Н., К р и м о в Н. М., Результат действия статистического изменения параметров на движение динамических консервативных систем в течение достаточно длительного времени, в кн.: Б о г о л у б о в Н. Н., Избр. труды, т. 1, К., 1968; 4) К о р н ф е л д И. П., С и н и а й Н. Р., Ф о м я н С. В., Эргодическая теория, М., 1980.

Д. Н. Зубарев.

**МЕТРИЧЕСКИЙ ТЕНЗОР** — дважды ковариантный симметричный тензор  $g_{ij}(x)$ , заданный в области *риманова пространства* с координатами  $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)$ , причём матрица  $g_{ij}$  положительно определена:  $g_{ij} T^i T^j > 0$ , если вектор  $T \neq 0$  (принято соглашение о суммировании по повторяющимся индексам). При замене координат  $x^i \rightarrow y^i(x)$  *М. т.*  $g_{ij}$  переходит в  $\tilde{g}_{ij} = g_{kl}(dx^k/dy^i)(dx^l/dy^j)$ . *М. т.* введена наз. *римановой метрикой*, поскольку он определяет расстояния в римановом пространстве: если задана кривая  $x^i = x^i(t)$ ,  $a \leq t \leq b$ , то её длина

$$s = \int_a^b dt \left[ g_{ij}(x(t)) \frac{dx^i}{dt} \cdot \frac{dx^j}{dt} \right]^{1/2},$$

а элемент длины  $ds$  определён ф-лой  $ds = g_{ij} dx^i dx^j$ , правая часть к-рой наз. первой (основной) квадратичной формой. Элемент объёма  $dV = \sqrt{g} dx^1 \dots dx^n$ , а объём  $V(U)$  области  $U$  равен

$$V(U) = \int \sqrt{g} dx^1 \dots dx^n,$$

где  $g = \det \|g_{ij}\|$ . Если существуют координаты  $x^i$ , в к-рых *М. т.* имеет вид  $g_{ij}(x) = \delta_{ij}$ , где  $\delta_{ij} = 1$  при  $i=j$  и  $0$  в противном случае, то метрика наз. *евклидовой*, а сама область риманова пространства является областью *евклидова пространства*.

Кроме  $M$ , т. в. риманово пространство вводится ещё одна независимая структура — *связность*, задающая *ковариантную производную*  $\nabla_k M$ . М. т. наз. согласованным со связностью, если оно ковариантно постоянно:  $\nabla_k g_{ij} = 0$ . Тогда коэф. связности, или *Кристоффеля символа*, однозначно выражаются через  $M$ , т.:

$$\Gamma_{ij}^k = \frac{1}{2} g^{kl} \left( \frac{\partial g_{il}}{\partial x^j} + \frac{\partial g_{jl}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial x^k} \right).$$

В окрестности любой точки  $x_0$  можно ввести нормальные (римановы) координаты, такие, что  $\Gamma_{ij}^k|_{x=x_0} = 0$  или  $\partial g_{ij}/\partial x^k|_{x=x_0} = 0$ . Тогда в этой окрестности

$$g_{ij} = \delta_{ij} - (1/2) R_{ijkl} x^k x^l + \dots$$

Коэф.  $R_{ij}$ ,  $\Gamma_{ij}$  характеризуют отличие  $M$ , т. от евклидовой и являются компонентами *кривизны тензора*. Помимо внутр. характеристик многообразия,  $M$ , т. обладает скалярное произведение векторов  $\xi = (\xi^1, \dots, \xi^n)$  и  $\eta = (\eta^1, \dots, \eta^n)$ , касательных к многообразию в данной точке:  $(\xi, \eta) = g_{ij} \xi^i \eta^j$ ; скалярное произведение не зависит от выбора системы координат.

Понятие  $M$ , т. общепотребительно при описании сплошной среды, при формулировке теории поля в криволинейных координатах, а особенно — в теории относительности и теории тяготения.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; Рацевский Я. П., Риманова геометрия и тензорный анализ, 3 изд., М., 1987; Фок В. А., Теория пространства, времени и тяготения, 2 изд., М., 1961; Дубровин Б. А., Новиков С. П., Фоминко А. Т., Современная геометрия, 2 изд., М., 1986. В. П. Павлов.

**МЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ** — радиоволны в диапазоне частот от 30 до 300 МГц (длины волн 1—10 м). М. в. распространяются преим. как *земные волны* в пределах прямой видимости на расстояния до десятков км. Характеристики распространения М. в. существенно зависят от рельефа местности и типа подстилающей поверхности. Влияние атмосферы Земли выражается в рассеянии М. в. слабыми неоднородностями ионосферы и тропосферы, отражении М. в. от ионоизоров, следов метеоров и искусств. ионоизоров. областей в атмосфере, что приводит к дальнему (на расстояния до 2 тыс. км) распространению М. в. (см. *Загоризонтное распространение радиоволн*, *Метеорная радиосвязь*). М. в. широко используют в радиовещании и телевидении, в метеорологических системах связи и радиолокации ионосферного рассеяния, а также при диагностике ионосферной плазмы с борта ИСЗ, ракет и т. п.

Лит. см. при ст. *Распространение радиоволн*.

**МЕТРОЛОГИЯ** — наука об измерениях и методах осуществления их повсеместного единства и требуемой точности. Осн. проблемы  $M$ . — общая теория измерений, образование единиц физ. величин и их систем, методы и средства измерений, методы определения точности измерений (теория погрешностей измерений), основы обеспечения единства измерений и метрологии, исправности средств измерений (законодательная  $M$ .), создание эталонов и образцов средств измерений, методы передачи размеров единиц от эталонов образцовым и далее рабочим средствам измерений.

Первоначально  $M$ . занималась описанием мер (линейных, вместимости, веса, времени), а также монет, применявшихся в разных странах, и нахождением соотношений между ними (теперь это область историч.  $M$ .). Поворотным моментом в развитии  $M$ . стало заключение в 1875 Метрич. конвенции (17 государствами, в т. ч. Россией), учреждение Междунар. бюро мер и весов и создание эталонов метрич. мер. Совр.  $M$ . опирается на физ. эксперимент высокой точности, она использует достижения физик, химии и др. естеств. наук, но вместе с тем находит свои оптим. решения задач изучения свойств физ. объектов.

Общая теория измерений включает сведения и обобщения, получаемые в результате анализа и изучения измерений и их элементов: физ. величин, их единиц, средств и методов измерений, результатов измерений.

$M$ . занимается получением объективной количественной оценки физ. величин. Под физ. величиной понимают физ. свойства объекта (системы), общее в качестве отношения для мн. объектов, но индивидуальное для каждого из них в количестве. отношения (напр., масса, темп-ра, скорость движения). Для измерения физ. величин выбирают её единицу, а для нек-рых величин (велич., темп-ры) — шкалу физ. величин. Единица — это конкретное количеств. значение физ. величин, условно принятое равным единице. С развитием науки от случайного или связанного с привычными для человека масштабами выбора единиц отвл. величин перешли к построению систем единиц на основе закономерных связей между физ. величинами.

Каждое измерение выполняется с помощью одного или нескольких спец. техн. средств (средств измерений), градуированных в принятых единицах с помощью эталонов единиц и прошедших проверку с помощью образцов средств измерений.  $M$ . изучает способы воспроизведения единиц с помощью эталонов и пути повышения их точности, а также методы проверки.

Большой раздел  $M$ . посвящён методам нахождения оценок *погрешностей измерений*, для чего используется аппарат теории вероятностей и матем. статистики.

Законодательная  $M$ . рассматривает вопросы, связанные с достижением единства измерений и единообразия средств измерения и нуждающихся в регламентации и контроле со стороны государства. Для проведения в жизнь всех необходимых для этого мероприятий в СССР организована метрологич. служба, к-рую возглавляет Государств. комитет стандартов Совета Министров СССР. Науч. сторону метрологии, службы обеспечивают метрологич. ин-ты, хранящие эталоны и ведущие науч. исследования по проблемам метрологии.

Лит.: Маликов С. Ф., Турин Н. И., Введение в метрологию, 2 изд., М., 1986; Бурдун Г. Д., Марков Б. И., Основы метрологии, 3 изд., М., 1985; Широкое К. П., Об основных понятиях метрологии, «Тр. метрологич. ин-та СССР», 1972, в. 130, с. 8.

**МЕХАНИКА** — наука о механич. движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними. Под механич. движением понимают изменение с течением времени взаимного положения тел или их частиц в пространстве; напр., движение небесных тел, колебания земной коры, воздушные и морские течения, движения летат. аппаратов и транспортных средств, машин и механизмов, деформации элементов конструкций и сооружений, движения жидкостей и газов и др. Рассматриваемые в  $M$ . взаимодействия представляют собой те действия тел друг на друга, результаты к-рых являются изменения скоростей точек этих тел или их деформации, напр. притяжения тел по закону всемирного тяготения, взаимные давления соприкасающихся тел, водения частиц жидкости или газа друг на друга и на движущиеся (или покоящиеся) в них тела и т. п.

Под  $M$ . обычно понимают т. в. классич.  $M$ . в основе к-рой лежат *Ньютона законы механики*, а предметом её изучения являются движения любых материальных тел (кроме *элементарных частиц*), совершаемые со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света. Движение тел со скоростями порядка скорости света рассматриваются в *относительности теории*, а внутриатомные явления и движение элементарных частиц изучаются в *квантовой механике*.

При изучении движения материальных тел в  $M$ . вводят ряд абстрактных понятий, отражающих те или иные свойства реальных тел; ими являются: 1) материальная точка — объект пренебрежимо малых размеров, имеющий массу; это понятие применимо, когда тело движется поступательно или когда в изучаемом движении можно пренебречь вращением тела вокруг его центра масс. 2) Абсолютно твёрдое тело — тело, расстояние между двумя любыми точками к-рого всегда остаётся неизменным; это понятие применимо, когда можно пренебречь деформацией тела. 3) Сплошная из-

молема среда; это понятие применимо, когда при изучении движения изменяемой среды (деформируемого твердого тела, жидкости, газа) можно пренебречь молекулярной структурой среды. При изучении сплошных сред прибегают к след. абстракциям, отражающим при данных условиях наиб. свойств. свойства соответствующих реальных тел: идеально упругое тело, пластич. тело, идеальная жидкость, вязкая жидкость, идеальный газ и др. В соответствии с этим М. разделяют на М. материальной точки, М. системы материальных точек, М. абсолютно твердого тела и М. сплошной среды. Последняя, в свою очередь, подразделяется на теорию упругости, теорию пластичности, гидродинамику, аэродинамику, газовую динамику и др. В каждом из этих подразделов в соответствии с характером решаемых задач выделяют *статистику* — учение о равновесии тел под действием сил, *кинематику* — учение о геом. свойствах движения тела и *динамику* — учение о движении тел под действием сил. Изучение осн. законов и принципов, к-рым подчиняется механич. движение тел, и вытекающих из этих законов и принципов общих теорем и у-рий составляет содержание т. я. общей, или теоретической, М. Разделами М., имеющими самостоят. значение, являются также теория колебаний, теория устойчивости движений, механика тел переменной массы, теория автоматич. регулирования, теория удара и др.

М. тесно связана с др. разделами физики. Ряд понятий и методов М. при соответствующих обобщениях находят приложение в оптике, статистич. физике, квантовой М., электродинамике, теории относительности и др. (см., напр., *Действие, Лагранжа функция, Наименьшее действие принципа*). Кроме того, при решении ряда задач *газовой динамики*, теории *жаров*, теплообмена в движущихся жидкостях и газах, *магнитной гидродинамики* и др. одновременно используются методы и у-рия как теоретич. М., так и термодинамики, молекулярной физики, теории электричества и др. Важное значение М. имеет для мн. разделов астрономии, особенно для небесной М.

Часть М., непосредственно связанную с техникой, составляют многочисленные общетехн. и спец. дисциплины, такие, как гидравлика, сопротивление материалов, строят. М., кинематика механизмов, динамика машин и механизмов, теория гидроскопич. устройств, внеш. баллистика, динамика ракет, теория движения наземных, морских и воздушных транспортных средств и др. Все эти дисциплины пользуются у-риями и методами теоретич. М. Таким образом, М. — одна из наук, осн. мн. областей совр. техники.

**Основные понятия в методах механики.** Осн. кинематич. мерой движения в М. являются: для точки — её скорость и ускорение, для твердого тела — скорость и ускорение поступат. движения и угл. скорость и угл. ускорение вращат. движения. Кинематич. состояние деформируемого твердого тела характеризуется относит. удлинениями и сдвигами его частей; совокупность этих величин определяет т. я. тензор деформаций. Для жидкости и газов кинематич. состояние характеризуется тензором скоростей деформаций; при изучении поля скоростей движущейся жидкости пользуются также понятием вихря, характеризующего вращение частицы.

Осн. мерой механич. взаимодействия материальных тел в М. является сила. Одновременно в М. пользуются понятием *момента силы* относительно точки и относительно оси. В М. сплошной среды силы задаются их поверхностным или объёмным распределением, т. е. отношением величин силы к площади поверхности (для поверхности сил) или к объёму (для массовых сил), на к-рые соответствующая сила действует. Возникающие в сплошной среде внутр. напряжения характеризуются в каждой точке среды касательными и нормальными напряжениями, совокупность к-рых представляет собой величину, называемую тензором напряжений.

Среднее арифметическое трёх нормальных напряжений, взятое с обратным знаком, определяет величину, называемую давлением в данной точке среды.

На движение тела, помимо действующих сил, оказывает влияние степень его инертности. Для материальной точки мерой инертности является её масса. Инертность материального тела зависит от его общей массы и от распределения масс в теле, к-рое характеризуется положением центра масс и величинами, называемыми осевыми и центробежными *моментами инерции*; совокупность этих величин определяет т. я. тензор инертности. Инертность жидкости или газа характеризуется их *плотностью*.

В оснве М. лежат три закона Ньютона. Первые два справедливы по отношению к т. я. *инерциальной системе отсчёта*. Второй закон даёт осн. у-рия для решения задач динамики точки, а вместе с третьим — для решения задач динамики системы материальных точек. В М. сплошной среды, кроме законов Ньютона, используются законы, отражающие свойства данной среды и устанавливающие для неё связь между тензором напряжений и тензорами деформаций или скоростей деформаций. Такими *Законом Гука* закон для линейно-упругого тела и закон Ньютона для вязкой жидкости (см. *Вязкость*). О законах, к-рым подчиняются др. среды, см. в ст. *Пластичности теория, Реология*.

Важное значение для решения задач М. имеют понятия о динамич. мерах движения, к-рым являются кол-во движения (см. *Импульс*), *момент количества движения* и *кинетическая энергия*, и о мерах действия силы, каковыми служат *импульс сил* и *работа*. Соотношения между мерами движения и мерами действия силы дают т. я. общие теоремы динамики. Эти теоремы и вытекающие из них законы сохранения кол-ва движения, момента кол-ва движения и механич. энергии выражают свойства движения любой системы материальных точек и сплошной среды.

Эфф. методы изучения равновесия и движения несвободной механч. системы (см. *Связи механические*) ведут *вариационные принципы механики*, в частности *возможные перемещение принципа*, наим. действия принципа, а также *Д'Аламбера принципа*. При решении задач М. широко используют вытекающие из её законов или принципов дифференц. у-рия движения материальной точки, твердого тела и системы материальных точек, в частности у-рия Лагранжа, канонич. у-рия, у-рия Гамильтона — Якоби, а в М. сплошной среды — соответствующие у-рия равновесия или движения этой среды, у-рия неразрывности (сплошности) среды и у-рия энергии.

**Основные этапы развития механики.** М. — одна из древнейших наук, возникшая из нужд практики. Раньше др. разделов М. под влиянием запросов гл. обр. строят. техники стала развиваться статика. Её науч. основы (теория рычага, сложные параллельных сил, учение о центре тяжести, начала гидростатики и др.) разработал ещё Архимед (3 в. до н. э.).

Периодом создания науч. осн. динамики, а с ней и всей М. явился 17 в. Основоположиком динамики — Г. Галилей (G. Galilei), к-рый дал первое верное решение задачи о движении тела под действием силы; его исследования привели к открытию закона инерции и принципа относительности классич. М.; им же положено начало теории колебаний и науке о сопротивлении материалов. Исследования движения точки по окружности, колебаний физ. маятника и законов упругого удара тел принадлежит Х. Гюйгенсу (Ch. Huygens). Создание осн. классич. М. завершается трудами И. Ньютона (I. Newton), сформулировавшего осн. зак. Ньютона (1687) и открывшего закон всемирного тяготения. В 17 в. были установлены и два осн. положения М. сплошной среды: закон вязкого трения в жидкостях и газах (Ньютон, 1684) и закон, выражающий зависимость между напряжениями и деформациями в упругом теле (Р. Гук (R. Hooke), 1660).

В 18 в. интенсивно развиваются аналитич. методы решения задач М. Для материальной точки эти методы разработал Л. Эйлер (L. Euler), заложивший также основы динамики твёрдого тела. Аналитич. методы решения задач динамики системы основываются на принципе возможных перемещений и на принципе, высказанном Ж. Л. Д'Аламбером (J. L. D'Alembert), разработку к-рых завершил Ж. Л. Лагранж (J. L. Lagrange), получивший ур-ния движения системы в обобщённых координатах; им же разработаны основы совр. теории колебаний. Др. путь решения задач М. исходит из принципа наим. действия в форме, высказанной для точки П. Л. Монпертой (P. L. Maupertuis) и обобщённой на случай системы точек Лагранжем. В М. сплошной среды Эйлером, Д. Бернулли (D. Bernoulli), а также Лагранжем и Д'Аламбером были разработаны теоретич. основы гидродинамики идеальной жидкости.

В 19 в. продолжается интенсивное развитие всех разделов М., чему способствовали исследования М. В. Остроградского, У. Р. Гамильтона (W. R. Hamilton), К. Г. Якоби (K. G. Jacobi), Г. Герца (H. Hertz) и др. Э. Раусом (E. Routh), Н. Е. Жуковским и А. М. Ляпуновым была разработана теория устойчивости равновесия и движения. И. А. Вышнеградский заложил основы совр. теории автоматич. регулирования. Доказанная Г. Г. Корнелисом (G. S. Coriolis) теорема о составляющих ускорения легла в основу динамики движения. Кинематика, развивающаяся одновременно с динамикой, выделяется во 2-й пол. 19 в. в самостоят. раздел М.

Значит. развитие в 19 в. получила М. сплошной среды. Л. Навье (L. Navier) и О. Л. Коши (A. L. Cauchy) установили общие ур-ния теории упругости. Исследования Навье и Дж. Г. Стокса (G. G. Stokes) привели к установлению дифференц. ур-ний движения вязкой жидкости. Развитию динамики идеальной и вязкой жидкости способствовали труды Г. Гельмгольца (H. Helmholtz) (учение о вихрях), Г. Р. Кирхгофа (G. R. Kirchhoff), Жуковского (отрывное обтекание тел), О. Рейнольдса (O. Reynolds) (начало изучения турбулентных течений), Н. П. Петрова (гидродинамич. теория трения при смазке), Л. Прандтля (L. Prandtl) (теория пограничного слоя) и др. А. Сен-Венан (A. Saint-Venant) предложил первую матем. теорию пластич. течения металла.

В 20 в. интенсивно развивается теория нелинейных колебаний, основы к-рой заложены Ляпуновым и А. Пуанкаре (H. Poincaré). М. тел перем. массы и динамика ракет, где ряд исходных исследований принадлежит И. В. Мещерскому (труды кон. 19 в.) и К. Э. Циолковскому. В М. сплошной среды выявляются два раздела: аэродинамика, основы к-рой созданы Жуковским, и газовая динамика, основы к-рой заложены С. А. Чаплыгиным.

Современные проблемы механики. К числу этих проблем относятся уже отмечавшиеся задачи теории колебаний (особенно нелинейных), динамики твёрдого тела, теории устойчивости движения, а также М. тел перем. массы и динамики космич. полётов. Всё большее значение приобретают задачи, требующие применения вероятностных методов расчёта, в э. задачах, в к-рых, напр., для действующих сил известна лишь вероятность того, какие значения они могут иметь. В М. непрерывной среды весьма актуальны проблемы: изучения поведения макрочастиц при изменении их формы, что связано с разработкой более строгой теории турбулентного течения жидкости; решения задач теории пластичности и ползучести; создания обоснованной теории прочности и разрушения твёрдого тела.

Большой круг задач М. связан с изучением движения плазмы в магн. поле (магн. гидродинамика), т. е. с решением одной из самых актуальных проблем совр. физики — осуществлением управляемого термоядерного синтеза. В гидродинамике ряд важнейших задач связан с проблемами больших скоростей в авиации,

баллистике, турбиностроении и двигателестроении. Много новых задач возникает на стыке М. с др. областями наук. К ним относятся проблемы гидротермостатии, т. е. исследования механич. процессов в жидкостях и газах, вступающих в хим. реакции, изучение сил, вызывающих деление клеток, механизмы образования мускульной силы и др.

При решении мн. задач М. используются электронные вычислительные и аналоговые машины; разработаны методы решения новых задач М. с помощью этих машин (особенно М. сплошной среды) — также весьма актуальная проблема.

Лит.: Г а л и л е в Г. Сок., [пер. с итал.], т. 1, М.—Л., 1934; Н ь ю т о н И., Математическая начала натуральной философии, [пер. с лат.], в кн.: К р а м о в А. И., Собр. трудов, т. 7, М.—Л., 1936; Э й л е р Л., Основы динамики точки, пер. с лат., М.—Л., 1938; Д'А л а м б е р Ж., Динамика, пер. с франц., М.—Л., 1950; Л а г р а н ж Ж.-Л., Аналитическая механика, пер. с франц., т. 1—2, 2 изд., М.—Л., 1950; Ж у к о в с к и й Н. Е., Теоретическая механика, 2 изд., М.—Л., 1952; Б у х а р о в Н. И., Основной курс теоретической механики, ч. 1, 9 изд., ч. 2, 8 изд., М., 1972; История механики с древнейших времён до конца XVIII в., М., 1971; В е с е л о в с к и й И. И., Очерки по истории теоретической механики, М., 1974; Механика в СССР за 50 лет, т. 1—3, М., 1968—72; см. также лит. при ст. Гидроаэромеханика, Упругость теории и Пластичности теории. С. М. Тара.

**МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА** — то же, что *гидроаэромеханика*; раздел механики сплошных сред, в к-ром изучается равновесие и движение жидких и газообразных сред, их взаимодействие между собой и с твёрдыми телами. Более общее назв.— механика жидкости, газа и плазм — объединяет все разделы механики сплошных сред, кроме механики твёрдого тела (в т. ч. и деформированного). Осн. проблемы, исследуемые в М. ж. и г., изложены в ст. *Аэродинамика, Газовая динамика, Гидравлика, Гидроаэромеханика, Гидродинамика, Динамика разреженных газов, Магнитная гидродинамика* и др.

**МЕХАНИКА СПЛОШНОЙ СРЕДЫ** — раздел механики, посвящённый изучению движения и равновесия газов, жидкостей и деформируемых твёрдых тел; подразделяется на *гидроаэромеханику, газовую динамику, упругости теорию, пластичности теорию*. Осн. предмет изучения М. с. состоит в том, что вещество можно рассматривать как непрерывную, сплошную среду, пренебрегая его молекулярным (атомным) строением, в противном случае непрерывное распределение в среде всех её характеристик (плотности, напряжений, скорости частиц и др.). Эти допущения позволяют применять в М. с. хорошо разработанный для непрерывных ф-ций аппарат высшей математики на основании того, что размеры молекул ничтожно малы по сравнению с размерами частиц, к-рые рассматривают при исследованиях в М. с. с.

Исходными в М. с. с. при изучении любой среды являются: 1) ур-ния движения или равновесия среды, получаемые как следствие осн. законов механики; 2) ур-ние неразрывности (сплошности) среды, являющееся следствием закона сохранения массы; 3) ур-ние сохранения энергии. Особенности каждой конкретной среды учитываются т. н. ур-нием состояния, или реологич. ур-нием, устанавливающим для данной среды вид зависимости между напряжениями и деформациями или скоростями деформации частиц среды. Характеристики среды могут также зависеть от темп-ры и др. физико-хим. параметров; вид таких зависимостей должен устанавливаться дополнительно. Кроме того, при решении каждой конкретной задачи должны задаваться начальные и граничные условия, вид к-рых тоже зависит от особенностей среды. М. с. с. находит огромное число важных приложений в разл. областях физики и техники.

Лит.: Л а н д а у Л. Д., Л и ф ш и ц Е. М., Гидродинамика, 4 изд., М., 1988; и т. же. Теория упругости, 4 изд., М., 1987; С т о к с Л. И., Механика сплошной среды, 4 изд., М., 1983—84. С. М. Тара.

**МЕХАНИКА ТЕЛ ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ** — раздел теоретич. механики, изучающий движение материаль-

ных тел, масса к-рых изменяется во время движения. Осн. исследование по М. т. п. м. принадлежит И. В. Мещерскому и К. Э. Циолковскому. Задачи М. т. п. м. возникают в связи с равновесием авиационной и ракетной техники, а также теоретич. механики и астрономии. Частью задачей М. т. п. м. является движение тел с пост. массой, но по мом. моментом инерции. Изменение массы тела (точки) во время движения может обуславливаться отделением (отбрасыванием) частиц или их присоединением (налипанием). При полёте совр. реактивных самолётов с воздушно-реактивными двигателями происходит одновременно процессы как присоединения, так и отделения частиц. Масса таких самолётов увеличивается за счёт воздуха, засасываемого в двигатель, и уменьшается в результате отбрасывания продуктов горения топлива. Осн. векторное дифференц. ур-ние движения точки перем. массы для случая присоединения и отделения частиц, полученное в 1904 Мещерским, имеет вид

$$M \frac{dv}{dt} = F + \frac{dM}{dt} V_1 + \frac{dM_2}{dt} V_2, \quad (*)$$

где  $M$  — масса точки,  $v$  — её скорость,  $t$  — время,  $F$  — равнодействующая приложенных сил,  $V_1$  — относит. скорость отделяющихся частиц,  $\left| \frac{dM_1}{dt} \right|$  — секундный расход массы,  $V_2$  — относит. скорость присоединяющихся частиц,  $\left| \frac{dM_2}{dt} \right|$  — секундный приход массы. Произведение  $(dM_1/dt)V_1 = \Phi_1$  — реактивная тяга, а  $(dM_2/dt)V_2 = \Phi_2$  — тормозящая сила, обусловленная присоединением частиц. Для совр. ракет ур-ние движения получается из (\*) при условии, что  $\Phi_2 = 0$ .

В М. т. п. м. рассматриваются два класса задач: определение траектории центра масс и определение движения тела перем. массы около центра масс. В ряде случаев можно найти траекторные характеристики движения центра масс, исходя из ур-ий динамики точки перем. массы. Изучение движения тел перем. массы около центра масс важно для исследования динамич. устойчивости реальных объектов (ракет, самолётов), их управляемости и маневренности. К задачам М. т. п. м. относятся также отскакивание оптим. режимов движения, т. е. определение таких законов изменения массы тела или точки, при к-рых кинематич. или динамич. характеристики их движения становятся наилучшими. Наиб. эфф. методы решения таких задач — методы вариационного исчисления.

Важной задачей М. т. п. м. с твёрдой оболочкой является изучение движения этих тел при нек-рых допущ. условиях, налагаемых на скорость центра масс. Такие задачи возникают, напр., при изучении движения телеуправляемых ракет и беспилотных самолётов, вводимых на цель автоматически или по радиокомандам с Земли, или по командам, вырабатываемым головками самонаведения. Для зенитных управляемых ракет и ракет класса «воздух — воздух» (предназначенных для стрельбы с самолёта по самолёту) процесс изменения массы происходит, как правило, на всей траектории полёта.

Большое число работ по М. т. п. м. относится к изучению движения небесных тел. Допуская, что увеличение массы небесного тела происходит за счёт налипания космич. пыли, приходят к допущ. условию о равенстве нулю абс. скорости налипющих частиц. Ур-ние движения точки перем. массы в этом случае принимает вид

$$\frac{d}{dt}(Mv) = F.$$

Интерполируя реальные законы изменения массы небесных тел простыми алгебраич. ф-циями времени (законы Мещерского), можно аналитически исследовать движение точки перем. массы в поле центральных сил. Мещерскому принадлежит постановка обратных

задач М. т. п. м., в к-рых определяется априорн измененная масса точки по нек-рым заданным условиям наблюдаемого движения в известном поле сил.

Для нек-рых задач небесной механики Мещерский указал такие преобразования переменных (координат и времени), при помощи к-рых ур-ния точки перем. массы переходят в ур-ния точки пост. массы (в новом пространстве-времени). М. т. п. м. находит приложение при исследованиях и в др. областях, напр. в текстильной промышленности и радиолокации.

Лит.: Мещерский И. В. Работы по механике тел перем. массы, 2 изд., М., 1952; Циолковский К. Э., Собр. соч., т. 2, М., 1954; Михайлов Г. К., К истории динамики систем переменного состава и теории реактивного движения, М., 1974; Гродзковский Г. Л., Иванов Ю. И., Токарев В. В., Механика космического полёта, М., 1975; Акулиничко Л. Д., Асимптотические методы оптимального управления, М., 1987. А. А. Космодемьянский.

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** материалов — реакция материала на приложенные механич. нагрузки. Осн. характеристиками механич. свойств являются напряжения и деформации. Напряжения — характеристика сил, к-рые относят к единице сечения образца материала или изделия, конструкции из него. Деформация чаще всего оценивают безразмерной величиной относит. изменения длины, стрелой прогиба или углом закручивания.

М. с. конструкц. материалов (металлов и сплавов, полимеров, стекла, керамики, текстильных нитей и тканей, дерева и др.) устанавливают механич. испытаниями, целью к-рых чаще всего является нахождение связи между приложенными механич. напряжениями к материалу и его деформацией. М. с. существенно зависят от структуры испытываемого материала и схемы приложенных сил. Поэтому они не являются физ. константами и не характеризуют сил межмолекулярного взаимодействия материала. Для простоты сопоставления М. с. разных материалов испытания проводят при несложных, легко воспроизводимых схемах нагружения (приложение веш. сил) — одноосном растяжении (или сжатии), изгибе, кручении. При сопоставлении М. с. разных материалов или одного материала с равной структурой следует иметь в виду соблюдение условий подобия испытаний (одинаковые схемы напряжённого состояния, скорости приложения нагрузок и физ.-механич. условия среды испытаний, а также геом. подобие — форма и размеры испытываемого образца). М. с. существенно зависят от темп-ры и давления.

Механич. испытания можно классифицировать по напряжённому состоянию (схема приложенных сил), способу нагружения при испытаниях (деформирование с заданной скоростью и измерение сил сопротивления деформации), приложению пост. нагрузки (или напряжений) и измерению сил сопротивления деформированию, по характеру изменения статич., динамич. или циклич. нагрузок (напряжений) во времени. Статич. нагрузками считают либо такие, к-рые не изменяются со временем, либо изменяющиеся в течение секунд или минут. При динамич. нагружении возрастание нагрузок происходит за доли секунды, а циклические характеризуются периодич. изменением направления и величины статич. или динамич. нагрузки.

М. с. классифицируются по физ. природе получаемых характеристик.

Упругость — свойство твёрдых тел сопротивляться изменению их объёма или формы под действием механич. напряжений и самопроизвольно восстанавливать исходное состояние при прекращении веш. воздействий. Характеризуется пределом упругости — макс. напряжением, после удаления к-рого форма и размеры образца полностью восстанавливаются; *модулем упругости* — коэф. пропорциональности, связывающим напряжение и упругую деформацию. Единств. характеристика М. с., дающая информацию о межмолекулярном взаимодействии в кристаллич. решётке материала, — вторая производная энергии взаимодействия атомов (ионов) по расстоянию между ними. 129

В области упругости часто имеют место отклонения от упругих свойств, к-рые характеризуются релаксацией напряжения, *последствием упрочим, внутренним трением*, дефектом модуля упругости.

**Прочность** — сопротивление разрушению (разрыву); характеризуется напряжениями, соответствующими максимальным (до разрушения образца) значениям нагрузки (т. е. предел прочности или временное сопротивление).

Характер разрушения при всех видах испытаний (растяжения, сжатия, изгибе, кручении) как под действием нормальных (отрыв), так и сдвиговых (срез) напряжений бывает вязким или хрупким. Различие между вязким и хрупким разрушениями заключается в величине пластич. деформации, накопленной перед разрушением. Оба вида разрушения связаны с зарождением и развитием трещин. Оценка сопротивления разрушению при обычных статич. испытаниях (предел прочности, временное сопротивление разрушению) часто недостаточна для определения пригодности материала как конструкционного, особенно при наличии надрезов, трещин и др. концентраторов напряжений. В этом случае применяют испытания на вязкость разрушения, при к-рых используют образцы с заранее созданными в них трещинами, и оценивают параметр ( $K_{Ic}$ ), к-рый наз. коэф. интенсивности напряжений. Определяют этот коэф. для плоского ( $K_{Ic}$ ) или объемного ( $K_{Ic}^3$ ) напряженных состояний.

К прочностным свойствам относят также и сопротивление пластич. деформации. Обычно пластич. деформация характеризует напряжениями, необходимыми для достижения нек-рой заданной величины остаточных деформаций. Так, предел текучести определяет напряжения, вызывающие при растяжении пластич. деформации 0,2% (обозначается  $\sigma_{0,2}$ ).

**Пластичность** — свойство твердых тел не-обратимо деформироваться под действием внешн. сил или внутр. напряжений. В качестве характеристик пластичности наиб. широко распространены удлинение (относит. изменение длины при растяжении) и отност. сужение в шейке — изменение поперечного сечения образца после прекращения равномерного удлинения (потери устойчивости) и образования шейки.

Сопротивление динамич. нагрузкам оценивают величиной ударной вязкости — удельная работа разрушения при ударном изгибе образцов с надрезом (для относительно пластичных материалов) или без надреза (для менее пластичных материалов).

**Жаропрочность** — способность материалов работать длит. время не деформируясь и не разрушаясь при приложенных нагрузках и высоких темп-рах. Осн. характеристиками жаропрочности являются предел ползучести и длит. прочность. Предел ползучести, т. е. величину напряжений, при к-рой скорость ползучести не превышает заданного значения, определяют для каждой темп-ры из зависимости скорости установившейся ползучести от напряжений. Аналогично этому, величину длит. прочности материала для заданной темп-ры определяют из зависимости времени до разрушения от напряжений. Напр., устанавливают напряжения (или нагрузку), при к-ром разрушение при заданной пост. темп-ре  $T$  происходит за 100 ч ( $\sigma_T$ ).

Важной характеристикой жаропрочности является также длит. пластичность, т. е. величина деформации, накапливаемая в течение ползучести до момента разрушения. Часто жаропрочность характеризуют просто временем до разрушения при заданных и постоянных напряжениях и темп-ре. Во мн. случаях жаропрочность оценивают пределом прочности или др. подобными характеристиками при повышенной темп-ре. В этом случае говорят о кратковрем. жаропрочности.

**Усталость** — процесс накопления повреждаемости в материалах под воздействием циклически изменяющихся напряжений, к-рые по своей величине не

превышают предела упругости. Схема приложенных напряжений и характер их изменения во времени могут быть различными. Сопротивление усталости наз. в зависимости от вида нагружения. Для изучения усталости материала строят диаграммы зависимости числа циклов изменения напряжений от амплитуды макс. напряжений цикла  $\sigma_{max}$ . При понижении  $\sigma_{max}$  до определ. величины эта зависимость либо начинает изменяться независимо, либо остается постоянной. Уровень таких напряжений наз. пределом усталости. Изучают также зависимость числа циклов до разрушения от амплитуды деформации.

Весьма распространенной характеристикой М. с. является твердость, к-рая представляет собой сопротивление материала вдаиванию. Несмотря на нек-рую неопределенность физ. природы этого свойства, благодаря простоте измерения, легкости воспроизведения и высокой корреляции с прочностью твердость стала широко распространенной характеристикой М. с.

В технике распространение получили т. н. технол. пробы, показывающие способность конструкц. материала к тем или иным деформациям: проба по Эрншену, показывающая способность материала к глубокой вытяжке; пластичность при кручении, гиб с перегибом — показатели пластичности материала и его податливости к отд. видам обработки давлением.

Лит.: Бернштейн М. Л., Зайковский В. А., Механические свойства металлов, 2 изд., М., 1979; Золоторевский И. В. С., Механические свойства металлов, 2 изд., М., 1983; В. М. Розенберг, **МЕХАНИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ СВЕТА** — отношение полного потока излучения (мощности излучения) к содержащемуся в нём световому потоку. Понятие М. э. с. применяется обычно для монохроматич. излучения и зависит от длины волны света  $\lambda$ , для  $\lambda = 555$  м м. э. с. имеет наиб. значение, равное 0,00146 Вт/лм. Величина, обратная М. э. с., наз. световой эффективностью излучения.

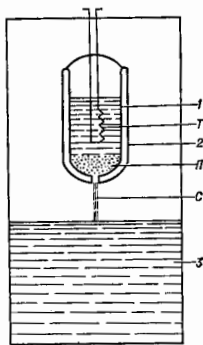
**МЕХАНИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ ТЕПЛОТЫ** — количество работы, эквивалентное единице количества теплоты (1 кал или 1 ккал). Понятие М. э. т. возникло установлением эквивалентности механич. работы и теплоты и открытием *закона сохранения энергии*. Введение М. э. т. потребовалось для сопоставления значений этих физ. величин, измерявшихся в разл. единицах. Экспериментально установлено, что 1 ккал = = 426,9 кгс·м.

В Международной системе единиц СИ для работы и кол-ва теплоты принята одна единица измерения — джоуль (1 Дж = 0,239 кал = 0,102 кгс·м), поэтому пользоваться понятием М. э. т. нет необходимости.

**МЕХАНОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ** — явление охлаждения сверхтекучего жидкого гелия, вытекающего из сосуда через узкий капилляр под действием разности давлений, сопровождаемого разрывом гелия, остающегося в сосуде (см. *Гелиев жидкий, Сверхтекучесть*). М. э. обнаружен в сверхтекучем <sup>4</sup>He в 1939 Дж. Доутом и К. Мендельсоном [1] (рис.). М. э. возникает вследствие того, что точки отверстия (для <sup>4</sup>He два) отверстий менее 1 мкм, для <sup>3</sup>He — порядка десятка мкм) действуют как «энтронный фильтр», преим. пропускающая сверхтекучую компоненту жидкости, не пропускающая тела (см. *Ландау теория сверхтекучести*) [2]. Процесс при небольших перепадах протекает почти обратно с устанавливается, если при разности давлений  $\Delta p$  устанавливается разность темп-р  $\Delta T$  такая, что  $\Delta p = \rho \Delta T$ , где  $\rho$  — плотность гелия,  $S$  — энтропия единицы массы гелия. Обратный процесс — возникновение разности давлений под действием разности темп-р в двух сообщающихся через капилляр или разделенных пористой перегородкой сосуда со сверхтекучим гелием — наз. термомеханич. эффектом.

На основе М. э. В. М. Пешковым в 1948 создан излучатель волн *второго звука*, представляющий собой

пористую перегородку, разделяющую ванну с гелием на два объёма [3]. Периодич. изменения давления с одной стороны от перегородки вызывают появление осциллирующего противотока сверхтекучей и нормальной компонент жидкости с др. стороны перегородки и генерируют волны второго звука (колебания темп-ры и вихрионы). Метод Пешкова применён для обнаружения второго звука в сверхтекучем  $^3\text{He}$ -В С. Т. Лу и Х. Кодзимой [4], а также волн намагнитченности в сверх-



Опыт Дк. Доунта и К. Менделевича при быстром вытекании сверхтекучего жидкого гелия  $I$  из закрытого сосуда Дьюара  $II$  через мелнопористую пробку температура в сосуде повышалась примерно на 0,01 К;  $T$  — термометр сопротивления,  $\Pi$  — пробка из мелкого морузда,  $C$  — струя гелия. Перед опытом сосуд был погружён в жидкий сверхтекучий  $^3\text{He}$ .

текучем  $^3\text{He}$ -А, Л. Р. Корруччини и Д. Ошеровым (L. R. Corriccinni, D. Osheroff, 1980).

Лит.: 1) Д а н и л о в, М е н д е л и в и ч, К., Surface transport in liquid helium 2, Nature, 1939, v. 143, № 3822, p. 719; 2) З и к о в в а К. Н., Гелий жидкий, в кн.: Физический энциклопедический словарь, т. 1, М., 1960, с. 401; 3) П е ш к о в В. М., Изучение свойств второго звука, ЖЭТФ, 1943, т. 18, с. 337; 4) Л у С. Т., К о д з и м о й Х., Observation of second sound in superfluid  $^3\text{He}$ -B, Phys. Rev. Lett., 1985, v. 55, p. 1677. В. П. Мисеев.

**МЕХАНОСТРИКЦИЯ** — дополнит. деформация, возникающая в упорядоченных магнетиках (ферро-, ферри- и антиферромагнетиках) при наложении на них механич. напряжений. Наложение напряжений приводит к перераспределению магн. моментов доменов, что ведёт к изменению намагнитченности, а это в свою очередь через посредство *магнитострикции* даёт дополнит. деформацию. Вклады в  $M$  (как и в вызванную магн. полем магнитостриксию  $\lambda$ ) в общем случае определяются процессами, связанными и со смещением границ доменов, и с вращением результирующих векторов самопроизвольной намагнитченности  $M_s$  доменов (см. *Намагничивание*). Чаще всего речь идёт о продольных деформациях: растяжение (напряжение  $\sigma > 0$ ) — сжатие ( $\sigma < 0$ ). В случае  $\sigma > 0$  прямая  $AO$  на рис. 1 характеризует относительное упругое удли-

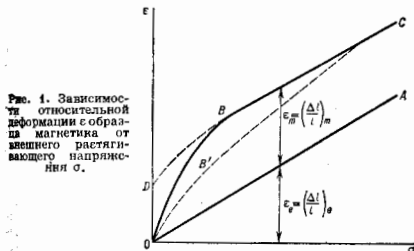


Рис. 1. Зависимость относительной деформации  $\epsilon_r$  от внешнего растягивающего напряжения  $\sigma$ .

нение  $\epsilon_r$  образца в зависимости от  $\sigma$ ; тогда кривая  $ABC$  — зависимость от  $\sigma$  полного удлинения  $\epsilon = \epsilon_m + \epsilon_r$ , где  $\epsilon_m$  и  $\epsilon_r$  в магнетомягких материалах кривая  $OB$  идёт круче, в менее мягких — более полого

( $OB$ ), т. к. смещение доменных стенок в последних затруднено и отступление от *Закона Гука* в них проявляется не так заметно. Наложение на образец с  $\lambda > 0$  магн. поля вызывает его магнитостриксию  $OD$ , и при последующем росте  $\sigma$  влияние оплещается кривой  $DBC$ , а  $M$  окажется соответствием мельше.

$M$  может только увеличивать общую деформацию. Это связано с тем, что при упругом растяжении в случае  $\lambda > 0$  векторы  $M_s$  доменов образца поворачиваются вдоль направления растяжения; в случае  $\lambda < 0$  векторы  $M_s$  стремятся расположиться в плоскости, перпендикулярной направлению растяжения. — при этом  $M$ , «поперечная» к векторам  $M_s$ , будет также положительна. Из теории следует, что явление  $M$  связано со знаком магнитоупругой энергии — произведением  $\lambda_0 \sigma$ , где  $\lambda_0$  — магнитострикция насыщения. У соединений, содержащих редкоземельные элементы и обладающих большой ( $\sim 10^{-3}$ ) величиной  $\lambda_0$ , знак величины  $\lambda_0 \sigma$  определяет зависимость  $M$  от напряжения и магн. поля.

В ряде *инварных сплавов* и редкоземельных сплавов и соединений, особенно вблизи темп-р *магнитных фазовых переходов*, упругие деформации вызывают заметное изменение не только направления, но и величины  $M_s$ , что через посредство объёмной магнитострикции  $\omega$  парапарноса может приводить к добавочной  $M$  — за счёт «механопапарапроцесса».

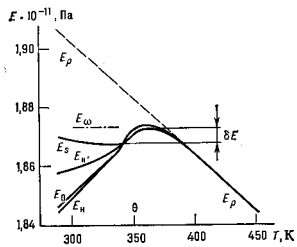
С  $M$  непосредственно связан  $\Delta E$ -эффект — зависимость модуля упругости  $E$  изотропных (поликристаллич. или аморфных) ферро-, ферри- и антиферромагнетиков от величины магн. поля. В отсутствие внеш. магн. поля, когда векторы  $M_s$  доменов «свободны», механич. напряжение, наложенное на образец, вызывает обычно упругое удлинение  $\epsilon_0$  и удлинение  $\epsilon_m$  магнитостриксионной природы, т. е.  $E_0 = \sigma / (\epsilon_0 + \epsilon_m)$ , где  $E_0$  — модуль упругости упорядоченного магнетика в немагнитном состоянии. Наложение сильного магн. поля, закрепляя все векторы  $M_s$  и вызывая магнитостриксию насыщения  $\lambda_s$ , сводит к нулю  $\epsilon_m$ ; т. е. модуль  $E_s$  магнетика, намагнитченного до «технического» насыщения, равен  $E_s = \sigma$  модулю при отсутствии  $M$ . Макс.  $\Delta E$ -эффект  $\Delta E/E_0 = (E_s - E_0)/E_0$ . Расчёты показывают, что  $\Delta E/E_0 = A \lambda_s^2 \lambda_0 E_s / M_s^2$ , где  $\lambda_0$  — нач. восприимчивость данного процесса намагнитченности,  $A \approx 1$  (числовая константа). Т. о., макс.  $\Delta E$ -эффект велик в материалах с большой магнитостриксией, малой магнитокристаллич. анизотропией, малыми значениями напряжений. Напр., у ожеженного  $\text{Ni}$   $\Delta E/E_0 = 19$ –22%. У соединений с большой  $\lambda_0$  ( $\text{Tb}_{0,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_2$  и  $\text{UFe}_2$ ) обнаружен  $\Delta E$ -эффект, достигающий 160%.

Вычисление зависимости  $\Delta E$ -эффекта от магн. поля  $H$  представляет собой более сложную задачу, оно возможно, если известна ф-ция распределения векторов  $M_s$  всех доменов образца. У ряда магнетиков в сравнительно слабых полях можно наблюдать уменьшение модуля  $E_H$  от значения  $E_0$  и только затем его рост до  $E_m$ . Это т. п. отрицательный  $\Delta E$ -эффект, к-рый связывают с преодолением задержки смещения границ доменов и др. подобными процессами.

У ферромагнетиков в нек-рой области темп-р  $T$  выше темп-ры Кюри  $\theta$  модуль  $E$  обычно меняется с темп-рой линейно. Экстраполяция его значений на область  $T < \theta$  даёт значения «намагнитного» модуля  $E_p$ . Для мн. магнетиков  $E_s \approx E_p$ . Но во мн. случаях, напр. у  $\text{Ni}$ , на графике  $E(T)$  в районе  $\theta$  заметен небольшой «положительный» изыток: при  $T < \theta$  величина  $E_s$  несколько больше  $E_p$ . В общем случае на таком графике при  $T = \theta$  могут наблюдаться как положительный, так и отрицательный изыток, и, кроме того, более или менее размытый скачок модуля  $\Delta E$  того или иного знака, также связанный с добавочной  $M$ . На рис. 2 такая зависимость показана для инварного сплава  $\text{Ni}_{39}\text{Co}_{36}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{15}$ , имеющего  $\theta = 347$  К. В районе  $T = \theta$  виден небольшой скачок значения  $E$  ( $\Delta E \approx 0,3\%$  от  $E_0$ ). На



рис. 2. Зависимости модуля упругости  $E_p$  поликристаллического образца инвариного сплава Fe-Ni-Cr от температуры  $T$  в различных магнитных полях.



разница между  $E_p$  и  $E_{\omega}$  объясняется явлением спонтанной магнитострикции: возникающим при  $T = \theta$  и зависящим от темп-ры изменением параметров кристаллич. решетки магнетика, связанным с действием обменных сил. Подобное явление наблюдается также в ферри- и антиферромагнетиках.

Во многом аналогичная  $\Delta E$ -эффекту зависимость модуля сдвига  $G$  вязкоупругих магнетиков носит назв.  $\Delta G$ -эффекта. При исследовании упругих свойств монокристаллов магнитоупорядоченных веществ в зависимости от магн. поля рассматривается поведение или модуля  $E$  вдоль данного направления в кристалле, или, чаще, упругих констант кристалла (см. Лука закон).

Лит.: В о с о в с к и й С. В., Шу р Я. С., Ферромагнетизм, М. — Л., 1948; Б е л о в К. П., Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках, 2 изд., М., 1957; К а т а е в Г. И., О ферромагнитной аномалии модуля Юнга и модуля сдвига сплавов инвариного класса, «Физ. мет. и металловед.», 1961, т. 11, с. 375; Н о в и к о в В. Ф., Д о л г и х Е. В., Механострикция высокомагнитоупорядоченных соединений редкоземельных металлов с железом, «ФТТ», 1984, т. 26, с. 214; К а т а е в Г. И. и др., Влияние магнитного поля на модуль упругости гексагонального ферромагнетика с аксиотропией типа «легкая плоскость» (на примере монокристалла Ть., Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), «ЖЭТФ», 1985, т. 89, с. 1416. Г. И. Катаев.

**МЕЧЕНЬЕ АТОМЫ** — то же, что *изотопные индикаторы*.

**МЕЩЕРСКОЕ УРАВНЕНИЕ** — дифференц. ур-ние движения материальной точки перем. массы (см. *Мезанника тел переменн. массы*).

**МИ ТЕОРИЯ** — теория рассеяния (дифракции) плоской эл.-магн. волны на однородной сфере произвольного размера. Подробно разработана Г. Ми (G. Mie) в 1908.

Плоскую эл.-магн. волну, облучающую сферу, можно представить как суперпозицию сферич. волн, выходящих из центра сферы. Каждая из этих элементарных волн полярирует сферу и возбуждает в ней вторичную волну, к-рая излучается сферой. Эти вторичные волны и образуют рассеянный свет. Амплитуда, фаза и поляризация вторичной волны являются сложными ф-циями двух параметров  $\rho = ka$  ( $a$  — радиус частицы,  $k$  — волновое число) и комплексного показателя преломления  $n = n' - ik$  ( $n'$  — вещественный показатель преломления,  $k$  — показатель поглощения). Вторичные волны наз. *д ар ц и а л ь н ы м и* волнами М.и. Полная интенсивность рассеянного света определяется суммой бесконечного числа парциальных волн. При  $ka \ll 1$  и  $|n|ka \ll 1$  существует только первый член ряда, т. е. элеттрич. диполь. и М. т. приводит к ф-ле Рэлея (см. *Рассеяние света*). Если  $ka \ll 1$ , но  $|n|ka$  не мало, то при  $|n|ka = m\pi$  ( $m$  — целое число) сечение рассеяния резко возрастает до  $blka^2$  (р е з о н а н с ы М.и). При увеличении размеров частицы

интенсивность последующих парциальных эл.-магн. волн возрастает, а интенсивности волн с меньшими номерами осциллируют, причём амплитуда осциллиций убывает с ростом номера волны  $\sim 1/l$ . Для больших значений ( $ka > 1$ ) число учитываемых парциальных волн  $\sim ka$ .

Суммы, входящие в ф-лы для рассеянных полей, являются комплексными выражениями, к-рые в данном направлении ( $\theta, \varphi$ ) обладают разл. фазами. Это означает, что рассеянный свет эллиптически поляризован (находящий — линейно), причём эта поляризация в разных направлениях различна. Первая элеттрич. парциальная волна поляризована линейно. Линейная поляризация будет в общем случае в направлениях  $\varphi = 0$  и  $\varphi = \pi/2$ . Этот важный вывод на М. т. многократно проверялся и подтверждался в опытах с коллоидными растворами.

Полный коэф. рассеяния частицы в М. т. также представляется суммой коэф. для отдельных парциальных волн. Для больших частиц ( $ka \gg 1$ ) показатели ослабления света  $e = 2ka^2$ , т. е. он не зависит от  $n$  и равен удвоенному поперечному сечению частицы  $2ka^2$ . Это объясняется тем, что половина ослабления происходит аа счёт рассеяния и поглощения внутри частицы, а другая, тоже  $ka^2$ , вызвана дифракцией (рассеянием) света на контуре частицы [1, 2, 3].

Форма индикатрисы рассеяния света  $\chi(\gamma)$  на сфере ( $\gamma$  — угол рассеяния) также зависит от  $ka$  и  $n$ . Для рэлеевских частиц  $\chi(\gamma) \propto (1 + \cos^2\gamma)$ , индикатриса имеет симметричную форму. С ростом  $ka$  индикатриса приобретает многолобовую форму, вытягиваясь вперёд. При  $ka \infty$  вокруг частицы образуется дифракц. конус, угол раствора к-рого  $\alpha \sim 1/ka$ . В дифрагиров. пучке наблюдается система постоянно убывающих тёмных и светлых колец, т. н. венцы. Обычно в реальной дисперсной системе вместо венцов в области малых углов происходит постепенное уменьшение интенсивности рассеяния. Это распределение интенсивности можно «обернуть», т. е. восстановить по нему ф-цию распределения частиц по размерам. Основанный на этой идее метод малых углов [4] используется в разнообразных технол. и геофиз. задачах.

С ростом  $ka$  изменяется также характер поляризации рассеянного света. Рэлеевская (линейная) поляризация, сильно осциллируя, постепенно приближается к поляризации, соответствующей геом. оптике. При углах  $\gamma < 90^\circ$  она оказывается отрицательной (т. е. плоскость преимущественной поляризации совпадает с плоскостью рассеяния), затем резко возрастает, максимальна при  $\gamma = 90^\circ$  и далее, при  $\gamma \rightarrow 180^\circ$ , стремится к нулю.

М. т. обобщена и на неоднородные сферы, на эллипсоиды вращения и трёхмерные эллипсоиды, на системы частиц случайной формы и ориентации. Точного решения задач дифракции на таких частицах нет, но разработано много приближённых методов расчёта [1—5]. М. т. служит основой изучения рассеяния света всех диапазонов, а также радиоволн; используется в оптике дисперсных сред, геофизике, радиофизике.

Лит.: 1) Ш и ф р и н К. С., Рассеяние света в мутной среде, М. — Л., 1951; 2) Х о л д с т Г., Рассеяние света малыми частицами, пер. с англ., М., 1961; 3) К е л к е г М., The scattering of light and other electromagnetic radiation, N. Y. — L., 1969; 4) Ш и ф р и н К. С., Введение в оптику океана, Л., 1983; 5) Б о р е н К., Х а ф м е н Д., Поглощение и рассеяние света малыми частицами, пер. с англ., М., 1980. К. С. Шифрин.

**МИГРАЦИЯ ЭНЕРГИИ** (от лат. migratio — перемещение) — один из процессов *переноса энергии* в конденсиров. средах, при к-ром энергия электронного возбуждения беззлучательно передаётся от возбуждённой частицы (молекулы, атома, иона) к такой же, во не возбуждённой частице, находящейся от первой на расстоянии, меньшем длины волны излучения. Многократное повторение этого процесса за время жизни возбуждённого состояния с участием большого числа иде-

тичных частиц приводит к пространственному перемещению возбуждения.

Взаимодействие возбужденной частицы с невозбужденной может быть мультипольным (диполь-дипольным, диполь-квадрупольным и т. д.) или обменным, возникающим при перекрытии электронных оболочек взаимодействующих частиц. Электронное возбуждение называется нелокализованным, если получившая энергию частица передает её др. частице так быстро, что за время жизни возбужденного состояния этой частицы не успевают установиться квазиравновесие между возбужденной частицей и окружающей средой (см. *Экситон*). В противном случае говорят о локализованном электронном возбуждении и вводят понятие скорости переноса,  $k$ -рая для обменного взаимодействия убывает с расстоянием экспоненциально; при  $3l$ -магн. взаимодействии эта скорость  $\sim R^{-m}$ , где  $3l$  — расстояние между взаимодействующими частицами, а  $m = 6, 8, 10$  для диполь-дипольного, диполь-квадрупольного и квадруполь-квадрупольного взаимодействий соответственно.

Т. о., процессы М. э. характерны для сред достаточно большой концентрации частиц, введенных в оптически инертный растворитель (жидкость, стекло, кристалл). М. э. является одним из механизмов деполаризации люминесценции (см. *Поляризованная люминесценция*), она также проявляется в запылении спектральных провалов и *уширении спектральных линий* люминесценции, появляющиеся после селективного воздействия возбуждающего излучения на неоднородно уширенные спектральные контуры.

М. э., сблизкая возбужденные частицы с невозбужденными частицами др. сорта, форсирует также др. процессы безмалозначительного переноса энергии — *тушение люминесценции*, сенсбилизацию люминесценции (см. *Кооперативная люминесценция*) и процессы взаимодействия частиц в возбужденных состояниях. М. э. в значит. степени определяет возможности приборов на основе люминесцирующих веществ и, в частности, возможности *твердотельных лазеров*. Она играет также большую роль в биол. процессах, напр. в процессах фотосинтеза.

*Лит.*: Безмалозначительный перенос энергии электронного возбуждения, *Дл.*, 1977; А г р а н о в и ч В. М., Г а л а н и н М. Д., Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах, М., 1978; Б у р з т е в а И. И., Концентрационное тушение некогерентных возбуждений в растворе, *СФН*, 1984, т. 143, с. 353; Ж е в а н д р о в Н. Д., Оптические аннотации и миграция энергии в молекулярных кристаллах, М., 1987; В. А. Смирнов, Д. А. Шербаков.

**МИДЕЛЕВое СЕЧЕНИЕ** (мидель) — для движущегося в воде или воздухе тела (напр., торпеды, корпуса судна, фюзеляжа самолёта, ракеты) наибольшее по площади сечение этого тела плоскостью, перпендикулярной направлению движения. К площади М. с. обычно относят действующую на тело силу сопротивления. Под площадью М. с. понимают также площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению его движения.

**МИКРО...** (от греч. *mikrós* — малый) — приставка к наименованию единиц измерения для образования наименования *дольной единицы*, составляющей одну миллионную долю от исходной единицы. Обозначается мк. н. Напр., 1 мкс (микросекунда) =  $10^{-6}$  с.

**МИКРОВОЛНОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ** — область радиоспектроскопии, в  $k$ -рой спектры атомов и молекул в газовой фазе исследуют в диапазоне от дециметровых до субмиллиметровых длин волны ( $10^8$  —  $10^{12}$  Гц). Объектами М. с. являются вращательные и  $N$ ч колебательные спектры молекул, молекулярных ионов, комплексов и радикалов, тонкая и сверхтонкая структура молекулярных спектров, спектры тонкой и сверхтонкой структуры атомов и ионов, электронные спектры возбужденных атомов (см. *Молекулярные спектры*, *Атомные спектры*). В микроволновых спектрометрах используют монокроматические, неретраиваемые по частоте источники излучения — генераторы СВЧ

(напр., *лампы обратной волны*, генераторы на основе *Ганна эффекта*); микроволновые спектры атомов и молекул регистрируют приёмниками СВЧ, оптоакустик, приёмниками, детекторами атомных и молекулярных пучков и др., что обусловлено разнообразием объектов и методов и желанием достигнуть в каждом случае макс. чувствительности спектрометров.

Применение когерентных источников излучения позволяет наблюдать методами М. с. весьма узкие спектральные линии, т. е. достигать высокого спектрального разрешения. Типичные ширины линий, обусловленные столкновениями частиц в газе, — от 10 МГц до 1 МГц при давлениях от 1 до  $10^2$  Па. При разрежении газа ширины линий определяются *Дольера эффектом* при движении частиц и соударениями со стенками поглощающей ячейки, они составляют в микроволновом диапазоне от 1 МГц до 0,1 МГц. Для дальнейшего сужения линий применяют ряд способов устранения доплеровского уширения. Ширины линий в таких субдоплеровских спектрометрах определяются временем взаимодействия частиц с полем излучения (см. *Неопределённости соотношения*). В *молекулярных* и *атомных пучках*, перпендикулярных направлению распространения излучения, ширины линий достигают 10—0,2 КГц, а при пленении частиц в областях размером менее длины волны линии сужаются до 0,01 Гц (т. н. сужение Дикке). Относит. погрешности измерения частот спектральных линий равны  $10^{-8}$  в газовых спектрометрах и достигают  $10^{-10}$  и  $10^{-13}$  в субдоплеровских спектрометрах.

Благодаря малой ширине наблюдаемых спектральных линий и высокой точности измерения частот радиометодами М. с. используют для получения воб. точных значений ряда атомных и молекулярных констант (напр., моментов инерции молекул, величин сверхтонкого расщепления уровней энергии в атомах, дипольных моментов молекул и др.) и наблюдения малых смещений и расщеплений уровней энергии, обусловленных тонкими взаимодействиями частиц (напр., эффектов нежёсткости молекул, *лабзовского сдвига* уровней в атомах, квадрупольной и магн. структуры уровней в молекулах).

В простейшем микроволновом спектрометре излучение генератора СВЧ пропускают через волноводную ячейку, наполненную исследуемым газом, и направляют на приёмник излучения, сигнал  $k$ -рого, пропорциональный принимаемой мощности, подаётся на регистрирующий прибор. Линии поглощения в газе регистрируют по уменьшению приходящей на приёмник мощности излучения определённых частот. Для повышения чувствительности спектрометров используют модуляцию частот спектральных линий, действуя на частицы электрич. (*Штарка эффект*) или магн. (*Зеемана эффект*) полем и выделяя сигнал на частоте модуляции. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах используют модуляцию частоты излучения источника и приём сигналов от линий поглощения по модуляции давления исследуемого газа при поглощении им модулиров. излучения (см. *Субмиллиметровая спектроскопия*). Большой запас чувствительности позволяет исследовать, напр., спектры нестабильных молекул, запрещённые спектры молекул, а также применять М. с. для молекулярного и изотопного спектрального анализа. Повышения чувствительности в раал. микроволновых спектрометрах достигают также как-чакт. вспомогат. излучения (т. н. *двойной резонанс*), сортировкой частиц по состояниям (см. *Молекулярный генератор*) и др.

М. с. применяют для получения данных спектров сведений о строении и динамике молекул, их хим. и изотопном составе, а при действии электрич. или магн. полей — дипольных моментов, поляризуемостей и магн. восприимчивостей молекул. Из исследования сверхтонкой структуры молекулярных спектров получают сведения о квадрупольных и магн. моментах ядер и

о внутр. полях в молекуле. Исследования расширения и сдвига молекулярных и атомных линий при соударениях в газе дают информацию о взаимодействиях частиц. Точное измерение частот переходов в простейших квадратных системах позволяет оценить точность фундам. теорий. Микроволновые спектральные линии неких молекул и атомов наблюдаются в космич. пространстве с помощью радиотелескопов, они дают информацию о составе межзвёздного вещества, хим. процессах и физ. условиях в разных областях космич. пространства. Лит.: Г. А. и Ч. Ш. А. и А. Р. Радиоспектроскопия, пер. с англ., М., 1959; Modern aspects of microwave spectroscopy, ed. by G. W. Chantry, L.—[а.о.], 1979; G. Ord y W. C. O. k R. L., Microwave molecular spectra, N. Y., 1984.

**МИКРОВОЛНОВОЕ ФОНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** (реликтовое излучение) — космич. излучение, имеющее спектр, характерный для абсолютно чёрного тела при темп-ре ок. 3 К; определяет интенсивность фонового излучения Вселенной в диапазоне сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн. Характеризуется высочайшей степенью изотропии (интенсивность практически одинакова во всех направлениях). Открытие М. ф. и. [А. Пензиас (A. Penzias), Р. Вильсон (R. Wilson), 1965] подтвердило т. н. *горячий Вселенной теорию*, дало важнейшее эксперим. свидетельство в пользу представлений об изотропии расширения Вселенной и её однородности в больших масштабах (см. *Космология*).

Согласно теории горячей Вселенной, вещество расширяющейся Вселенной имело в прошлом намного более высокую плотность, чем ныне и чрезвычайно высокую темп-ру. При  $T > 10^9$  К первичная плазма, состоявшая из протонов, ионов гелия и электронов, непрерывно излучающих, рассеивая фотоны и поглощающих фотоны, находилась в полном термодинамич. равновесии с излучением. В ходе последующего расширения Вселенной темп-ра плазмы и излучения падала. Взаимодействие частиц с фотонами уже не успевало за характерное время расширения заметно влиять на спектр излучения (*оптическая толщина* Вселенной по *теоретическому излучению* к этому времени стала много меньше единицы). Однако даже при полном отсутствии взаимодействия излучения с веществом в ходе расширения Вселенной чернотельный спектр излучения остаётся чернотельным, уменьшается лишь его темп-ра. Пока темп-ра превышала 4000 К, первичное вещество было полностью ионизовано, пробег фотонов от одного акта рассеяния до другого был много меньше *горизонта событий* во Вселенной. При  $T < 4000$  К произошла рекомбинация протонов и электронов, плазма превратилась в смесь нейтральных атомов водорода и гелия. Вселенная стала полностью прозрачной для излучения. В ходе её дальнейшего расширения темп-ра излучения продолжала падать, но чернотельный характер излучения сохранился как реликт или «память» о раннем периоде эволюции мира. Это излучение было обнаружено сначала на длине 7,35 см, а затем и на др. волнах (от 0,6 мм до 50 см).

Темп-ра М. ф. и. с точностью до 10% оказалась равной 2,7 К. Ср. энергия фотонов этого излучения крайне мала — в 3000 раз меньше энергии фотонов видимого света, но число фотонов М. ф. и. очень велико. На каждый атом во Вселенной приходится  $\sim 10^9$  фотонов М. ф. и. (в ср. 400—500 фотонов/см<sup>3</sup>).

Наряду с прямым методом определения темп-ры М. ф. и. — по кривой распределения энергии в спектре излучения (см. *Планка закон излучения*) — существует также косвенный метод — по населённости ниж. уровней энергии молекул в межзвёздной среде. При поглощении фотона М. ф. и. молекула переходит из осн. состояния в возбуждённое. Чем выше темп-ра излучения, тем выше плотность фотонов с энергией, достаточной для возбуждения молекул, и тем большая их доля находится на возбуждённом уровне. По кол-ву возбуждённых молекул (населённости уровней) можно судить

о темп-ре возбуждающего излучения. Так, наблюдения оптич. линий поглощения межзвёздного циана (CN) показывают, что его ниж. уровни энергии населены так, как будто молекулы CN находятся в поле трёхградусного чернотельного излучения. Этот факт был установлен (но не повят в полной мере) ещё в 1941, задолго до обнаружения М. ф. и. прямыми наблюдениями.

Ни звёзды и радиогалактики, ни горячий межгалактич. газ, ни переналучение видимого света межзвёздной пылью не могут дать излучения, приближающегося по свойствам к М. ф. и.; суммарная энергия этого излучения слишком велика, и спектр его не похож ни на спектр звёзд, ни на спектр радионисточников (рис. 1). Этим, а также практически полным отсутствием флуктуаций интенсивности по небесной сфере (мелкомасштабных угл. флуктуаций) доказываются космологич. реликтовое происхождение М. ф. и.

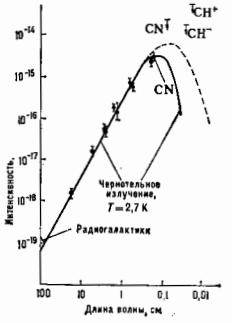


Рис. 1. Спектр микроволнового фоновое излучения Вселенной (интенсивность в эрг/см<sup>2</sup>·с·ср·Гц). Эксперим. точки нанесены с указанием погрешностей измерений. Точки CN, CN<sup>+</sup> соответствуют результатам определения верхней границы (показана стрелкой) температуры излучения по населённости уровней соответствующих межзвёздных молекул.

**Флуктуации М. ф. и.** Обнаружение небольших различий в интенсивности М. ф. и., принимаемого от разных участков небесной сферы, позволило бы сделать ряд выводов о характере первичных возмущений в веществе, приведших в дальнейшем к образованию галактик и скоплениям галактик. Совр. галактики и их скопления образовались в результате роста незначительных по амплитуде неоднородностей плотности вещества, существовавших до рекомбинации водорода во Вселенной (см. *Первичные флуктуации во Вселенной*). Для любой космологич. модели можно найти закоп роста амплитуды неоднородностей в ходе расширения Вселенной. Если знать, каковы были амплитуды неоднородности вещества в момент рекомбинации, можно установить, за какое время они могли вырасти и стать порядком единицы. После этого области с плотностью, значительно превышающей среднюю, должны были выделиться из общего расширяющегося фона и дать начало галактикам и их скоплениям (см. *Крупномасштабная структура Вселенной*). «Рассказать» об амплитуде начальных неоднородностей плотности в момент рекомбинации может лишь реликтовое излучение. Поскольку до рекомбинации излучение было жёстко связано с веществом (электроны рассеивали фотоны), то неоднородности в пространственном распределении вещества приводили к неоднородностям плотности энергии излучения, т. е. к различию темп-ры излучения в разных по плотности областях Вселенной. Когда после рекомбинации вещество перестало взаимодействовать с излучением и стало для него прозрачным, М. ф. и. должно было сохранить всю информацию о неоднородностях плотности во Вселенной в период рекомбинации. Если неоднородности существовали, то темп-ра М. ф. и. должна флуктуировать, зависеть от направления наблюдения. Однако эксперименты по обнаружению ожидаемых флуктуаций пока не дали измеримых значений. Они позволяют показать лишь верх. пределы значений флуктуаций. В малых угл. масштабах (от одной угл. минуты до шести градусов дуги) флуктуа-

ции не превышают  $10^{-4}$  К. Поиски флуктуаций М. ф. и, осложняются тем, что вклад во флуктуации фона дают дискретные космич. радиостанции, флуктуирует излучение атмосферы Земли и т. д. Эксперименты в больших угл. масштабах также показали, что темп-ра М. ф. и, практически не зависит от направления наблюдения: отклонения не превышают  $4 \cdot 10^{-3}$  К. Полученные данные позволяют связать оценку степени анизотропии расширения Вселенной в 100 раз по сравнению с оценкой по данным прямым наблюдений «разбегающихся» галактик.

М. ф. и, как «новый эфир». М. ф. и, изотропно лишь в системе координат, связанной с «разбегающимися» галактиками, в т. е. сопутствующей системе отсчёта (эта система расширяется вместе с Вселенной). В любой др. системе координат интенсивность излучения зависит от направления. Этот факт открывает возможность измерения скорости движения Солнца относительно системы координат, связанной с М. ф. и. Действительно, в силу *Доплера эффекта* фотоны, распространяющиеся навстречу движущемуся наблюдателю, имеют более высокую энергию, нежели догоняющие его, несмотря на то, что в системе, связанной с М. ф. и., их энергии равны. Поэтому и темп-ра излучения для такого наблюдателя оказывается зависящей от направления:  $T = T_0 [1 + (v/c) \cos \theta]$ , где  $T_0$  — средняя по небу темп-ра излучения,  $v$  — скорость наблюдателя,  $\theta$  — угол между вектором скорости и направлением наблюдения.

Анизотропия реликтового излучения, связанная с движением Солнечной системы относительно поля этого излучения, к настоящему времени твёрдо установлена (рис. 2), она имеет дипольный характер; в направле-

служит веским подтверждением модели горячей Вселенной.

Отметим, что в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн измерения темп-ры М. ф. и, возможны с поверхности Земли. В миллиметровом и особенно в субмиллиметровом диапазонах излучение атмосферы препятствует наблюдениям М. ф. и., поэтому измерения проводятся в шарообразных болометрах, установленных на воздушных шарах (баллонах) и ракетах. Ценные данные о спектре М. ф. и, в миллиметровой области получены из наблюдений линий поглощения молекулы *метилводной среды* в спектрах горячих звёзд. Выяснилось, что осн. вклад в плотность энергии М. ф. и, даёт излучение с длиной волны  $\lambda$  от 6 до 0,6 мм, темп-ра к-рого близка к 3 К. В этом диапазоне длин волн плотность энергии М. ф. и,  $\rho_{\nu} = 0,25$  эВ/см<sup>3</sup>. Один из экспериментов по определению флуктуаций М. ф. и., его дипольной компоненты и верх. границы квадратного излучения был осуществлён на ИСЗ «Прогноз-9» (СССР, 1983). Угл. разрешение аппарата составляло ок. 5°. Зарегистрированный тепловой контраст не превышал  $5 \cdot 10^{-4}$  К.

Многие из космологич. теорий и теорий образования галактик, к-рые рассматривают процессы *анизотропии* вещества и антивещества, диссипацию развитой *турбулентности*, крупномасштабных потенциальных движений, испарение первичных чёрных дыр малой массы, распад нестабильных элементарных частиц, предсказывают значит. энерговыделение на ранних стадиях расширения Вселенной. В то же время любое выделение энергии  $\Delta \rho \approx 1-10\%$   $\rho_{\nu}$  на этапе, когда темп-ра М. ф. и, менялась от  $3 \cdot 10^4$  К до 3 К, должно было заметно исказить его чернотельный спектр. Т. о., спектр М. ф. и, несёт информацию о тепловой истории Вселенной. Более того, эта информация оказывается дифференцированной: выделение энергии на каждом из трёх этапов расширения ( $3 \cdot 10^4 < T < 3 \cdot 10^3$  К;  $4 \cdot 10^3 < T < 3 \cdot 10^4$  К;  $3 < T < 4000$  К) вызывает специфич. искажение спектра. На первом этапе сильнее всего искажается спектр в ДВ-области, на втором и третьем — в коротковолновой. Свой вклад в искажение спектра в КВ-области вносит уже сам процесс рекомбинации. Фотоны, испускаемые при рекомбинации, обладают энергией ок. 10 эВ, что в десятки раз превышает ср. энергию фотонов равновесного излучения той эпохи (при  $T \approx 4000$  К). Таких энергетич. фотонов крайне мало ( $\sim 10^{-9}$  от общего их числа). Поэтому *рекомбинационное излучение*, возникающее при образовании нейтральных атомов, должно было сильно исказить спектр М. ф. и. на волнах  $\lambda \approx 250$  мкм.

Ещё один нагрев вещество Вселенной могло испытать при образовании галактик. Спектр М. ф. и, при этом также мог измениться, поскольку рассеяние реликтовых фотонов на горячих электронах увеличивает энергию фотонов (см. *Комптона эффект*). Особенно сильные изменения происходят в этом случае в КВ-области спектра. Одна из кривых, демонстрирующих возможное искажение спектра М. ф. и., приведена на рис. 1 (штриховая кривая). Имеющиеся изменения в спектре М. ф. и, показали, что вторичный разогрев вещества во Вселенной произошёл много позже рекомбинации.

М. ф. и, и космические лучи. *Космические лучи* (протоны и ядра высоких энергий; ультрарелятивистские электроны, определяющие радиоизлучение шашей и др. галактик в метровом диапазоне) несут информацию о гигантских взрывных процессах в звёздах и ядрах галактик, при к-рых они рождаются. Как оказалось, время жизни частиц высоких энергий во Вселенной во многом зависит от фотонов М. ф. и., обладающих малой энергией, но чрезвычайно многочисленных — их в миллиард раз больше, чем атомов во Вселенной (это соотношение сохраняется в процессе расширения Вселенной). При столкновении ультрарелятивистских электронов космич. лучей с фотонами М. ф. и, происходит перераспределение энергии и импульса. Энергия

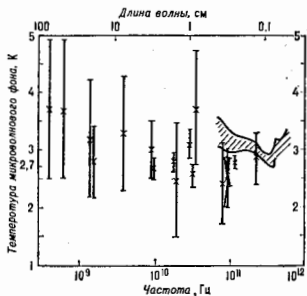


Рис. 2. Распределение яркости микроволнового фонового излучения на небесной сфере. Цифры характеризуют отклонения от средней по всей сфере температуры микроволнового фона в мК.

ни на созвездие Льва темп-ра М. ф. и, на  $3,5 \cdot 10^{-3}$  К превышает среднюю, а в противоположном направлении (созвездие Водолея) на столько же ниже средней. Следовательно, Солнце (вместе с Землей) движется относительно М. ф. и, со скоростью ок. 400 км/с по направлению к созвездию Льва. Точность наблюдений столь высока, что экспериментаторы фиксируют скорость движения Земли вокруг Солнца, составляющую 30 км/с. Учёт скорости движения Солнца вокруг центра Галактики позволяет определить скорость движения Галактики относительно М. ф. и. Она составляет  $\approx 600$  км/с. В принципе, существует метод, позволяющий определить скорости богатых скоплений галактик относительно реликтового излучения (см. *Скопления галактик*).

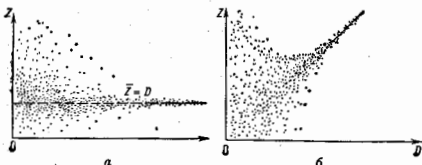
Спектр М. ф. и. На рис. 1 приведены существующие эксперим. данные о М. ф. и, и планковская кривая распределения энергии в спектре равновесного излучения абсолютно чёрного тела с темп-рой  $\approx 2,7$  К. Эксперим. точки хорошо согласуются с теоретич. кривой, что

фотона возрастает во много раз, и радиодиффотон превращается в фотон рентг. излучения, энергия же электрона меняется незначительно. Поскольку этот процесс повторяется многократно, электрон постепенно терпит всю энергию. Наблюдаемое со спутников и ракет рентг. фоновое излучение, по-видимому, частично связано своим происхождением этому процессу.

Протоны и ядра сверхвысоких энергий также подвержены воздействию фотонов М. ф. и.т.: при столкновениях с ними ядра расщепляются, а соударения с протонами приводят к рождению новых частиц (электрон-позитронных пар, пионов и т. д.). В результате энергия протонов быстро уменьшается до пороговой, ниже к-рой рождение частиц становится невозможным по законам сохранения энергии и импульса. Именно с этими процессами связывают практич. отсутствие в космич. лучах частиц с энергией  $\approx 10^{20}$  эВ, а также малое кол-во тяжёлых ядер.

Лит.: Зельдович Я. Б., «Горючая модель Вселенной», «УФН», 1966, т. 89, с. 647; Вайнберг С., Первые три минуты, пер. с англ., М., 1981. Р. А. Сюмак.

**МИКРОДОЗИМЕТРИЯ** — исследование микроскопич. распределения поглощённой энергии при воздействии *ионизирующего излучения* на объект (живой или неживой природы) и установление связи между параметрами этого распределения и откликом объекта на его облучение (радиационно-индукцированный эффект). Наблюдаемый радиац. эффект — результат сложных физ., физ.-хим. и биохим. процессов, вызванных поглощением энергии в его чувствит. структурах. Так, в полупроводниковых приборах чувствит. структурой может быть область *p-n-перехода*, или *гетероперехода*, в живом организме — клетка, в клетке — ядро, мембрана, хромосомы, молекула ДНК и т.п. В чувствит. областях возникают верничные «соединения» (ионизация и возбуждение атомов и молекул, диссоциация молекул, выбивание атомов и ионов из узлов кристаллич. решётки и др.), дающие начало цепочкам превращений, к-рые в конечном счёте приводят к наблюдаемому макроскопич. эффекту. В этих условиях отклик на облучение должен определяться не столько поглощённой дозой *D*, сколько распределением поглощённой энергии *f(Z)* по микрообъёмам для разных видов излучения. Осн. величиной в М. является т. в. уд. энергия *Z*, равная переданной энергии  $\epsilon$  малому объёму вещества, отнесённой к массе *m* этого объёма:  $Z = \epsilon/m$ . Акты передачи энергии внутри микрообъёма при попадании в него заряд. частицы являются случайными событиями. Вероятностный характер поглощения приводит к флуктуациям *Z*, к-рые тем значи-



Флуктуациям уд. энергии существенны для объёмов с линейными размерами  $\sim 1$  мкм.

Передаваемая в микрообъём энергии равна разности между суммарной кинетич. энергией всех ионизирующих частиц, попавших в данный микрообъём, и энергией частиц, покинувших его (в сумме с увеличением энергии внутри объёма за счёт ядерных реакций). Ср. энергия по микрообъёмам рассматривается как интегральная доза *D* в объёме:

$$D = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \int_0^{\Delta z} f(Z) dZ.$$

Стохастич. аналог ЛПЭ — т. н. линейная энергия  $\epsilon = E/l$ , где *l* — ср. длина хорды рассматриваемого микрообъёма (измеряется в КэВ·мкм<sup>-1</sup>). Распределение  $f(Z)$ , соответствующее определ. величине поглощённой дозы *D*, может быть записано в виде  $f(Z, D)$ . Пусть, напр., габель клеток при облучении наступает тогда, когда уд. энергия *Z* и чувствит. объём клетки превосходит нек-рое критич. значение  $Z_{кр}$ . При этом доля  $\Psi$  клеток, выживших после облучения:

$$\Psi(D) = \int_0^{Z_{кр}} f(Z, D) dZ.$$

В реальном случае, когда вероятность выживания клетки при поглощённой в её чувствит. объёме уд. энергии описывается как  $\Psi(Z)$ :

$$\Psi(D) = \int_0^{Z_{кр}} f(Z, D) \Psi(Z) dZ.$$

Ф-ция  $f(Z, D)$  может быть измерена или вычислена для разных микрообъёмов, а левые части соотношений найдены экспериментально.

М. применяют как для выявления закономерностей биол. действия разл. ионизирующих излучений, так и для оптич. планирования облучения в медицине. Микродозиметрич. метод используют также для исследования радиац. повреждений в твердотельной электронике.

Лит.: Иванов В. И., Лысцов В. Н., Основы микродозиметрии, М., 1979; Иванов В. И., Лысцов В. Н., Губин А. Т., Справочное руководство по микродозиметрии, М., 1986; Микродозиметрия. Доклад 38 МКРО, пер. с англ., М., 1988. В. И. Иванов.

**МИКРОКАНОНИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИББСА** — равновесное распределение вероятностей для статистич. ансамбля систем с заданной полной энергией  $\epsilon$  при пост. объёме *V* и пост. полном числе частиц *N*; соответствует микроканоническому ансамблю Гиббса. Установлено Дж. У. Гибсом (J. W. Gibbs) в 1901 для случая классич. статистики как один из осн. законов *статистической физики*.

В классич. статистич. механике ф-ция распределения  $f(p, q)$  зависит от координат и импульсов *p, q* всех частиц через *Гамильтона функцию*  $H(p, q)$ , к-рая является интегралом движения системы. Согласно М. р. Г., все микроскопич. состояния в узком слое энергии  $\Delta\epsilon \ll \epsilon$  равновероятны, а вероятности др. состояний равны нулю, т. е.

$$f(p, q) = \begin{cases} W^{-1}(\epsilon, N, V) & \text{при } \epsilon \leq H(p, q) \leq \epsilon + \Delta\epsilon, \\ 0 & \text{вне этого слоя,} \end{cases}$$

$W(\epsilon, N, V)$  — статистич. вес, определяемый из условия нормировки (суммарная вероятность пребывания системы во всех состояниях равна 1). Следовательно,

$$W(\epsilon, N, V) = (N! h^{3N})^{-1} \int_{H(\epsilon, \epsilon)} dp dq,$$

$$dp dq = dp_1 dq_1 \dots dp_{2N} dq_{2N};$$

тельное, чем меньше объём (рис. а, б), меньше доза излучения и чем больше линейные потери энергии (ЛПЭ) ионизирующих частиц. Величину флуктуаций можно проиллюстрировать на след. примерах: при дозе  $10^{-2}$  Гр *γ*-излучения отклонение *Z* от ср. значения  $\bar{Z}$  в объёме живой клетки  $\sim 10\%$ . При такой же дозе нейтронного излучения (значительно больше ЛПЭ) флуктуации таковы, что в 9 клетках из  $10 Z = 0$ , а в каждой 10-й клетке может превышать  $\bar{Z}$  в 10 раз; в объёме, занимаемом хромосомой (при той же дозе нейтронного излучения),  $Z = 0$  в 999 хромосом из 1000, а в одной из них может превышать  $\bar{Z}$  в 1000 раз.

эта величина слабо зависит от ширины слоев  $\Delta\sigma$ , при больших  $N$  этой зависимости можно пренебречь. В случае классич. механики можно перейти к пределу  $\Delta\sigma \rightarrow 0$  и записать М. р. Г. в виде

$$f(p, q) = W^{-1}(\mathcal{E}, N, V) \delta(H(p, q) - \mathcal{E}),$$

$\delta(\mathcal{E})$  — дельта-функция Дирака. Статист. вес связан с энтропией  $S(\mathcal{E}, N, V)$  соотношением

$$W(\mathcal{E}, N, V) = \exp(k^{-1}S(\mathcal{E}, N, V)).$$

В квантовой статистике механике рассматривают ансамбли замкнутых, энергетически изолированных систем с объемом  $V$  и числом частиц  $N$ , имеющих одинаковую энергию  $\mathcal{E}$  с точностью до  $\Delta\mathcal{E}$ . Величину  $\Delta\mathcal{E}$  выбирают малой, но конечной, т. к. точная фиксация энергии в квантовой механике, в соответствии с *неопределенностей соотношением* между энергией и временем, потребовала бы бесконечного времени наблюдения. Предполагается, что для таких систем все квантовомеханич. состояния с энергией  $\mathcal{E}_k$  от  $\mathcal{E}$  до  $\mathcal{E} + \Delta\mathcal{E}$  равновероятны, а вне этого слоя их вероятность равна нулю. Такое распределение вероятности  $w$  состояний системы:

$$w(\mathcal{E}_k) = \begin{cases} W^{-1}(\mathcal{E}, N, V) & \text{если } \mathcal{E}_k \leq \mathcal{E} + \Delta\mathcal{E}, \\ 0 & \text{вне этого слоя,} \end{cases}$$

наз. М. р. Г. для квантового статистич. ансамбля. Здесь  $W(\mathcal{E}, N, V)$  — статистич. вес, равный числу квантовых состояний в слое  $\Delta\mathcal{E}$  при фиксиров.  $\mathcal{E}, N, V$ ; оно определяется из условия нормировки вероятности  $\sum w(\mathcal{E}_k) = 1$ . В квантовом случае также можно устремить  $\Delta\mathcal{E}$  к нулю, такому М. р. Г. соответствует *статистический оператор* (матрица плотности)

$\rho = W^{-1} \delta(\hat{H} - \mathcal{E})$ , где  $\hat{H}$  — гамильтонян системы. М. р. Г. неудобно для практич. применений, т. к. для вычисления  $W$  нужно найти плотность распределения квантовых уровней для системы из большого числа частиц, что представляет собой сложную задачу. М. р. Г. важно для теоретич. исследований, т. к. на всех *Гиббса распределений* оно наиб. тесно связано с механикой. С помощью М. р. Г. доказывается теорема Гиббса о том, что малая подсистема большой системы, распределенной по М. р. Г., соответствует *каноническому распределению Гиббса*. Для конкретных задач удобнее рассматривать системы, находящиеся в тепловом контакте с окружающей средой, темп-ра к-рой постоянна (с термостатом), и применять канонич. распределение Гиббса или рассматривать системы, для к-рых возможен обмен энергией и частицами с термостатом, и использовать *большое каноническое распределение Гиббса*.

Лит. см. при ст. *Статистическая физика*. Д. Н. Зубарев. **МИКРОЛИТОГРАФИЯ** — формирование микросухонок на поверхности твердого тела. М. лежит в основе технологии *микрорезистороники*. Обычно М. включает: нанесение на поверхность твердого тела (подложки) тонкого слоя фоторезиста (материала, чувствительного к воздействию радиации); экспонирование отд. областей резиста соответственно заданному рисунку (фотошаблон) и проявление, т. е. удаление экспонированных (в позитивном процессе) или неэкспонированных (в негативном процессе) областей резиста. В результате формируется фоторезистивная пленочная маска, в «окнах» к-рой осуществляется технол. обработка поверхностного слоя подложки. Затем фоторезист обычно удаляется. Подобная процедура при изготовлении *интегральной схемы* повторяется, причём каждый последующий рисунок точно совмещается с предыдущим. Чередование М. с др. операциями ( травление, кристаллизация, напыление пленок, легирование, окисление и т. д.) позволяет создавать твердотельные структуры со сложной геометрией.

Важный показатель М. — разрешающая способность — характеризуется мин. шириной линий рисунка (проектной нормой). При возникновении М. (1958) проектная норма составляла 30–100 мкм, ко 2-й пол. 80-х гг. она достигла 1–2 мкм, а в экстрем. устройствах — 0,1 мкм. Формирование рисунка с шириной линий до 0,01–0,001 мкм (0,1–0,01 нм) наз. нанолитография.

По характеру экспонирующего излучения выделяют фотолитографию, *рентгеновую литографию*, электронолитографию и ионолитографию. Для фотолитографии наиб. критична длина волны  $\lambda$  излучения. В случае контактной печати (фотошаблон накладывается непосредственно на слой фоторезиста) разрешающая способность  $\Delta x \approx 2\lambda$ . Недостаток контактной печати — быстрое накопление дефектов в шаблоне и формируемых структурах. При проекц. печати  $\Delta x = 1,22\lambda F$ , где  $F = l/(2A)$ ,  $A$  — апертура проекц. системы. Наиб. широко распространены дуговые ртутные лампы ( $\lambda = 330$ –400 нм), для фотолитографии в глубокой УФ-области используют дейтериевые лампы ( $\lambda = 200$ –260 нм). Методы голографии М. позволяют упростить оптич. системы и исключить влияние дефектов шаблона и пылинки.

Рентгенолитография практически свободна от волновых ограничений разрешающей способности. Последняя в данном случае ограничивается в осн. эффектами полнети:  $\Delta x = S/(dD)$ , где  $S$  — ширина зазора между шаблоном и пластиной,  $d$  — диаметр источника излучения,  $D$  — расстояние от источника до шаблона. Для достижения субмикронного разрешения необходимы проекц. рентг. системы с  $S \leq 10$  мкм; при этом неоднородности эфф. величины зазора приводят к флуктуациям геом. искажений рисунка. Рентг. шаблоны представляют собой слоистые структуры на тонкой мембране, провидящей для рентг. излучения. Рисунок вытравлен из металла, пленки, поглащающих рентг. излучение. Наиб. перспективно *синхротронное излучение* высокой интенсивности с малой расходимостью пучка, благодаря чему эффект полнети исключается.

При электронолитографии используют либо параллельный поток электронов (проец. электронолитография), либо пучок электронов, сканирующий пластину (сканирующая электронолитография). Первый метод обладает более высокой производительностью, но требует сложных шаблонов и имеет ограниченную разрешающую способность. Второй позволяет достичь разрешения лучше 0,1 мкм (в экспериментах  $\Delta x = 2$  нм) и формировать изображение без помощи шаблона путём прямого управления лучом с помощью ЭВМ. Разрешающая способность электронолитографии определяется рассеянием электронов в резисте и их обратным рассеянием в результате отражения от подложки. Для уменьшения этих явлений применяют двухслойные резисты. Осн. проблема, препятствующая широкому внедрению электронолитографии в массовое произ-во интегральных схем, — низкая производительность сканирующих систем. Поэтому обычно её применяют в сочетании с фотолитографией и рентгенолитографией. При этом электронолитографию используют для формирования шаблонов и отдельных, наиб. ответственных рисунков на пластинах.

Ионолитография обладает свойствами сканирующей электронолитографии, но эффект обратного рассеяния здесь выражен значительно слабее. Жидкометаллич. ионные источники создают плотные пучки. Сканирующие ионные системы используют для прямого формирования структуры интегральных схем без шаблонов. При этом ионный пучок, управляемый ЭВМ, осуществляет легирование полупроводника, вносит в него локальные радиационные повреждения, осуществляет травление подложки. Однако производительность в этом случае низкая.

Лит. см. при ст. *Микроэлектроника*, *Интегральные схемы*. И. Ф. Дорджин.

**МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ** — внутр. напряжения, существующие в кристаллах в отсутствие внеш. сил и уравновешенные в объёмах, малых по сравнению с

объёмом всего тела. Источники М.— несовершенство кристаллич. строения: точечные дефекты и их скопления, дислокации и др. Расчёт М., осуществляемый с помощью теории упругости, показывает, что дислокации — наиб. важные источники медленно убывающего дальнедействующего поля М. (напряжения от дислокации убывают обратно пропорционально расстоянию  $r$  от её центра, в то время как напряжения от линейной цепочки точечных дефектов убывают как  $1/r^2$ , а от скопления точечных дефектов сферич. формы — как  $1/r^3$ ).

В зависимости от взаимного расположения дислокаций вызываемые ими напряжения могут либо складываться, образуя макронапряжения, убывающие на расстояниях порядка размеров кристалла, либо компенсировать друг друга и убывать на расстояниях порядка расстояния между дислокациями, образуя микронапряжения. По мере приближения к дефекту напряжения возрастают по величине и могут достигать значений порядка предела прочности материала. На расстояниях, близких к центру дефекта, в области очень сильных искажений кристаллич. решётки смещения атомов настолько велики, что деформации достигают величин порядка единицы, понятие напряжений теряет определ. физ. смысл и для описания искажения возникает необходимость учёта дискретности среды, её конкретной атомарной структуры. М. определяют ряд физ. свойств кристаллов, и прежде всего закономерности их пластич. деформирования и разрушения.

**МИКРОНЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ** — мелкомасштабные плазменные неустойчивости, опасные для удержания плазмы, к-рые не приводят к немедленному разрушению равновесного состояния плазмы, а оказывают влияние на её удержание через процессы переноса — диффузию частиц и теплопроводность. Именно в результате равнания М. п. появляются мелкомасштабные пульсации электрич., магн. полей и концентрации плазмы, к-рые увеличивают потоки частиц и тепла поперек магн. поля, удерживающего плазму.

Класс М. п. весьма обширен. В него входят: семейство дрейфовых неустойчивостей (дрейфовая универсальная, дрейфово-дисипативная, дрейфово-температурная и т. д.), связанных с градиентами концентрации и темп-ры плазмы; неустойчивости типа Кельвина — Гельмгольца в движущейся как целое плазме с неоднородным профилем скорости; конусные неустойчивости, связанные с анизотропным распределением электронов и наличием конуса потерь; токово-конвективная неустойчивость и др. (см. *Неустойчивости плазмы*). Источники энергии для М. п. могут служить неоднородности плазмы и удерживающего её магн. поля, неравновесные распределения частиц по скоростям, относительное движение заряд. компонент и пр.

Обычно коэф. переноса, обусловленные М. п., зависят не только от парных столкновений частиц, но гл. обр. от взаимодействий волна — частица и могут на много порядков превосходить их классич. значения (см. *Перенос процессов*); в этих случаях говорят об аномальной диффузии и теплопроводности плазмы. Теория аномального переноса даёт спектры колебаний, возбуждаемых М. п. на величине стадии равнания неустойчивости. Если возмущающая вследствие М. п. турбулентность можно представить в виде суперпозиции большого числа слабо взаимодействующих между собой колебаний, то она описывается методом слабой турбулентности с использованием квазилинейного приближения. Часто *турбулентность плазмы* оказывается сильной, поэтому при расчётах спектральных характеристик флуктуаций используют перенормировочные теории и размерностные оценки. Коэф. аномальной диффузии  $D_{\perp} \approx \lambda_m \gamma_m$ , где  $\lambda_m$  — длина волны, а  $\gamma_m$  — индекс роста наиб. неустойчивой моды колебаний. В случае дрейфово-дисипативной М. п. этот коэф.  $D_{\perp}$  порядка коэф. *Волна диффузии*  $D_a = c_t e^2 / 16 \pi e H$ .

Лит.: Rosenbluth M. N., *Microinstabilities*, в сб.: *Plasma physics*, Vienna, 1965, p. 455; А р и т м о в и ч Л. А., Са г д е в Р. З., *Физика плазмы для физиков*, М., 1973; М и х а й л о с к и й А. Б., *Неустойчивости неоднородной плазмы*, в кн.: *Основы физики плазмы*, т. 1, М., 1983. Н. С. Ерохин.

**МИКРОПРИЧИННОСТЬ** (локальность) — фундам. свойство взаимодействующих полей в локальной *квантовой теории поля*, состоящее в исчезновении коммутатора (антикоммутатора) операторов бозе-(формы)- поля  $\varphi(x)$  в *Гейзенберга представлениями*:

$$[\varphi(x), \varphi(y)]_z = 0 \quad (1)$$

в точках пространства-времени, разделённых пространственноподобным интервалом  $(x - y)^2 = (x_0 - y_0)^2 - (x - y)^2 < 0$  (см. также *Локальная коммутативность*). Условие М. в формулировке Н. Н. Боголюбова, эквивалентное (1) с точностью до локализованных в точке  $x=y$  членов (на массовой поверхности), имеет вид

$$\delta f(x)/\delta g(y) = 0, \quad f(x) = i\delta(\delta S/\delta g(x))^{S^*} \quad (2)$$

в области  $(x - y)^2 < 0$ , а также при временах  $x_0 < y_0$  в области  $(x - y)^2 > 0$  (вне светового конуса и во внутренней его полости, образённой в прошлое). Здесь  $S = S(g)$  — матрица рассеяния как функционал классич. поля  $g(x)$ , роль к-рого могут играть неоператорные добавки к операторам поля, ф-ция включения взаимодействия и т. д. (анак «+» означает эрмитово сопряжение). Условия (1), (2) относятся ко всем, в т. ч. сколь угодно малым, значениям разности  $x - y$ , что и отражает приставка «микро» в термине «М. п.».

Условие М. выполняется в аппарате квантовой теории поля многообразные ф-ции. В динамич. теории поля, основанной на полевом лагранжиане (замыкательном), эти условия существенно ограничивают его структуру, приводя к необходимости локальности взаимодействия (отнесения операторов поля в лагранжиане к одной точке пространства-времени), отсутствия высших производных и т. п. Одновременно условия М. придают аппарату теории должную однозначность, фиксируя правила обхода особенностей амплитуд взаимодействий полей. В *аксиоматической квантовой теории поля* условия М. играют конструктивную роль одного из осн. постулатов, заменяющих в совокупности динамич. базис теории поля. Соответствие условия М. лежит в основе общего, не опирающегося на конкретные модели вывода аксиоматич. теории возмущений, апалитич. свойств амплитуд взаимодействий в комплексной плоскости энергетич. перемещений, *дисперсионных соотношений* (см. также *Дисперсионных соотношений метод*), *теоремы СРТ*, *Померачука теоремы*, *Фруассара ограничения* и др.

Физ. первоосновой требования М. служит *причинности принцип*, запрещающий влияние данного события на все предшествующие события («будущее не влияет на прошлое»). Должно отсутствовать также взаимное влияние событий, разделённых пространственноподобным интервалом: их временная последовательность неабсолютна, и выбором системы отсчёта одно из них всегда может быть сделано предшествующим другому. Условия М. могли бы служить количеств. выраженным принципа причинности при всех значениях  $x - y$  лишь в случае физ. реализуемости понятия точечного (локализованного) в определ. точке пространства-времени события. Именно такой точечный характер имеют события в релятивистской теории (в *квантовой теории многих частиц*), когда соответствующий аналог требования М. допускает прямую физ. интерпретацию (см. *Крамерса — Кроника соотношения*).

Однако в релятивистской квантовой теории понятие точечного события лишено прямого физ. смысла. Это связано с *неопределённостью соотношениями*, устанавливающими ниж. границу протяжённости и длительности любого акта взаимодействия полей. измерения поля и т. п. Так, напр., координату покоящейся частицы мож-

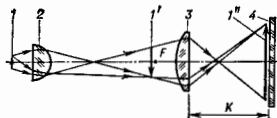
по фиксировать лишь с точностью до её *комптоновской длины волны*. Поэтому условия М. имеют весьма ограниченный физ. смысл. Ис следует рассматривать как формально-матем. требование, представляющее собой экстраполяцию физ. условия причинности в область малых расстояний и промежутков времени.

Отсюда следует возможность нарушения условий М. «в малом» без противоречия с физ. принципом причинности. Эта возможность составила основу *неаглоной квантовой теории поля*, получившей развитие в 1930—1960-х гг., когда трудности локальной теории подтолкнули её использование в теории элементарных частиц. Вместе с тем М. оказался столь тесно связанной с др. фундам. свойствами квантового поля (*релятивистской инвариантностью, унитарностью*), что для сохранения этих свойств в неаглоной теории потребовалась радикальная перестройка всего её аппарата. С др. стороны, предпринимались попытки (не приведшие к успеху) сформулировать «смичгненные» условия причинности — условия «макропричинности», либо учитывающие соотношения неопределённостей. Эти условия должны отличаться от (1) и (2) «в малом», допуская в области малых расстояний и промежутков времени ненаблюдаемые (вследствие соотношений неопределённостей) нарушения причинности.

Несмотря на отсутствие прямого физ. смысла условий М. «в малом», совр. теория фундам. взаимодействий, к-рая в значит. мере преодолела трудности локальной теории поля, использует эти условия вплоть до расстояний порядка квантово-гравитаци. длины (*планковской длины*)  $10^{-33}$  см. Проверка *квантовой электродинамики* и (с меньшей определённостью) дисперсионных соотношений подтвердила справедливость условий М. до расстояний порядка  $10^{-18}$  см и промежутков времени до  $10^{-26}$  с. Применимость этих условий и основанной на них локальной теории поля в области меньших масштабов, хотя и кажется очень вероятной в свете успехов совр. теории, требует ещё своего эксперим. обоснования.

Лит.: Боголюбов Н. Н., Ширнов Д. В., Введение в теорию квантовых полей, 4 изд., М., 1984; Киржица Д. А., Неполная квантовая теория поля, «УФН», 1966, т. 30, с. 129; Боголюбов Н. Н., Логутин А. А., Тодоров И. Т., Основы асимптотического подхода в квантовой теории поля, М., 1969; Нуссенц в Янг Х. М., Причинность и дисперсионные соотношения, пер. с англ., М., 1978. Д. А. Киржица.

**МИКРОПРОЕКЦИЯ** — получение на экране оптич. изображений малых объектов с помощью микроскопа. Объектив 2 микроскопа (рис.) образует, как обычно,



увеличенное действительное изображение  $I'$  объекта  $I$ , к-рое при М. устанавливает перед передним фокусом окуляра 3. Окуляр работает в этом случае как проекц. система и создаёт действительное изображение  $I''$  объекта в плоскости экрана 4. При М. линейное оптич. увеличение

$$\beta = \beta_{06} \Gamma_{06} K / 250 \approx \beta_{06} K / f'_{06}$$

где  $\beta_{06}$  и  $\Gamma_{06}$  — номинальные значения увеличений объекта и окуляра;  $f'_{06}$  — фокусное расстояние окуляра;  $K$  — расстояние от окуляра до экрана. Осещённость изображения  $E = \sqrt{B \Delta \lambda} / 2$ , где  $\sqrt{B}$  — коэф. пропускания оптич. системы микроскопа,  $B$  — яркость источника света,  $\Delta \lambda$  — апертура объектива. Для получения достаточной осещённости при М. требуется источники света высокой яркости.

М. применяется для демонстрации изображений одновременно, неск. наблюдателям, для удобства работы на ряде микроскопов. Наиб. распространена проекция на прозрачный экран (матовое стекло). М. используется также для получения изображений микрообъектов на светочувствит. слое фотоматериала (микрофотография и микроквантография), на мишене передающей трубки (телевизионная микроскопия), на фотопленке электронно-оптич. преобразователя (УФ- и ИК-микроскопия) и др.

Лит. см. при ст. Микроскоп. Г. В. Папанян.  
**МИКРОПРОЦЕССОР** (МП) — программно-управляемое универсальное устройство для цифровой обработки дискретной и (или) аналоговой информации и управления процессом этой обработки, построенное на одной или неск. больших *интегральных схемах* (БИС). По существу, МП может выполнять те же функции, что и процессор ЭВМ (или его составная часть), — отсюда с учётом изготовления его по технологии микроэлектроники произошло назв. «МП».

Области применения МП определяются, с одной стороны, возможностями МП как БИС — компонента электронных схем, а с другой — возможностями МП по обработке информации и управлению этим процессом, присущими ЭВМ. В совокупности с БИС постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) (см. Память устройства) и БИС управления вводом-выводом информации МП позволяет создавать универсальные ЭВМ, причём он выполняет функции процессора (организацию работы ЭВМ, логич. и арифметич. обработку информации). Др. область применения МП — специализиров. системы для сбора информации с объекта, её обработки и оптич. управления объектом. Примерами из этой области являются специализиров. управляющие МП (микронтроллеры) и приборы со встроенной микропроцессорной системой ввода-вывода информации и её обработки (г. н. интеллектуальные приборы).

Спектр применений МП в физике определяется наряду с этим ещё двумя обстоятельствами. Во-первых, МП, работающий от внеш. источника энергии и управляющий состоянием замкнутой системы, способен управлять изменением её энтропии заданным образом [1]. Эта способность широко используется в автоматизиров. устройствах управления системами для оптимизации либо повышения эффективности происходящих в них процессов (напр., удержание на заданном уровне темп-ры печи, в контур управления нагревателем к-рой включён МП). Во-вторых, любой алгоритм обработки информации можно реализовать программно (с помощью выполнения соответствующей программы универсальным МП) либо аппаратно (с помощью специализиров. МП, при разработке к-рого искомый алгоритм был реализован непосредственно в его электронной схеме). Последний способ обеспечивает макс. быстродействие алгоритма и представляет интерес в том случае, когда требуется обрабатывать информацию с частотой, превышающей частоту её обработки программным путём. Напр., для обработки изображений, следующих с частотой телевизионной развертки, широко используется фурые-МП, аппаратуру реализующий алгоритм быстрого преобразования Фурые.

МП характеризуются: полупроводниковой технологией изготовления интегральных схем, составными МП, их кол-вом; архитектурой (логич. организацией МП, определяющей процесс обработки информации в конкретном МП и включающей методы кодирования информации, состав, назначение и принципы взаимодействия аппаратных средств МП); набором инструкций; ёмкостью адресуемой памяти; производительностью; стоимостью и др. [1, 2, 4, 5].

Первый МП — 4-разрядный Intel-4004 (фирма Intel, США) — появился в 1971 в ходе разработки программируемого калькулятора. Он состоял из 4 БИС, мог адресовать 4,5 кбайт памяти и имел 45 инструкций



со временем выполнения 10—20 мкс. За ним в 1974 последовал 8-разрядный МП, а в 1978 насчитывалось уже св. 50 разл. типов МП. К 1989 разрядность МП увеличилась до 16—32 бит, время выполнения инструкций снизилось до 0,1—2 мкс, объём адресуемой памяти увеличился до десятков Мбайт.

По числу БИС, составляющих МП, их можно условно разделить на два существенно различных класса: однокристальные и многокристальные.

Однокристальные МП (ОМП) — функционально законченные процессоры с фиксируемыми разрядностью и набором инструкций. При этом инструкциями процессора являются инструкции ОМП. Обычно архитектура систем, построенных непосредственно на основе таких МП, повторяет архитектуру МП. Для построения системы достаточно подключить к ОМП блоки ОЗУ, ПЗУ, управления вводом-выводом информации и тактового генератора. ОМП различаются типом шин [типом набора проводников, функционально предназначенных для передачи информ. и (или) управляющих сигналов] адреса и данных; раздельные шины адреса и данных позволяют одновременно передавать по ним код адреса и данных; совмещённые шины адреса и данных позволяют передавать адрес и данные в разные моменты времени, причём сначала производится адресация, т. е. выбор источника или получателя информации, а затем обмен данными. Такой способ, несмотря на большую сложность, позволяет сократить кол-во проводников шины и уменьшить кол-во выводов ОМП, что весьма существенно при увеличении его разрядности.

ОМП различаются также по способу синхронизации при выдаче адреса и обмена данными. В синхронных системах все сигналы строго определены во времени и обмен ведётся без подтверждения факта получения или выдачи информации абонентом.

В синхронно-асинхронных системах передача адреса осуществляется синхронно, а обмен происходит при взаимном обмене источника информацией и её получателя сигналами подтверждения приёма (передачи) информации по след. схеме:

- источник начинает цикл обмена, выставляя данные на шине, и с помощью задержки, необходимой для надёжной установки данных на линиях связи, выставляет сигнал данные на шине;
- получатель по сигналу данные на шине производит их запись и только после этого выставляет сигнал данные получены на соответствующую линию связи;
- источник, получив сигнал данные получены, снимает сигнал данные на шине и сами данные;
- получатель после снятия сигнала данные на шине снимает сигнал данные получены;
- источник после снятия сигнала данные получены завершает текущий цикл обмена.

Этот способ обеспечивает высокую надёжность обмена, т. к. менее чувствителен к помехам, сбоям и временным характеристикам как узлов, участвующих в обмене, так и линий связи.

Многокристальные (секционные) МП (СМП) — секции разрядности 2, 4, 8 или 16 бит с фиксиров. набором инструкций для построения процессора с изменяемой разрядностью слова и разл. архитектурой. СМП позволяют создавать специализиров. процессоры с наборами инструкций, ориентированными на определ. применение (напр., фурье-анализ, процедуры обработки данных). При этом каждая инструкция такого специализиров. процессора состоит из последовательности инструкций (программы) СМП. В этом случае принято называть инструкцию СМП микроинструкциями, а процесс разработки инструкций процессора — микропрограммированием.

Наряду с удобствами применение СМП связано с определ. трудностями: требуется микропрограммирование инструкций процессора. Поэтому наиб. распространёнными являются ОМП. В то же время, благодаря микропрограммированию инструкций процессора, сос-

тоящего из СМП, можно достичь его макс. производительности. В этом направлении наиб. перспективна разработка процессоров с сокращённым набором инструкций RISC (от англ. Reduce Instruction Set).

Архитектура МП. Для программиста понятие архитектуры МП включает в себя совокупность аппаратных, программных и микропрограммных возможностей МП, важных при его программировании (внеш. архитектура). Для разработчика микропроцессорной аппаратуры важными особенностями, с точки зрения архитектуры МП, являются его аппаратная организация и логич. структура электронных схем, отд. блоков и связывающих их информ. шин (внутр. архитектура). Эти особенности могут быть отличными от внеш. архитектуры МП.

Существует два типа внутр. архитектуры процессора, построенного из СМП: вертикальная и горизонтальная. В случае вертикальной архитектуры секция является функционально законченным  $n$ -разрядным процессором (2, 4, 8 или 16 бит), допускающим наращивание разрядности слова объединением секций. При горизонтальной архитектуре построения процессора секция является одним из его узлов, объединяемых для получения  $n$ -разрядного процессора.

Внеш. архитектура МП, как правило, традиционна: один набор команд обрабатывает один набор данных — SISD (от англ. Single Instruction Single Data stream). Совр. МП в этом отношении предоставляют проектировщикам микропроцессорных систем новые возможности, т. к. большинство их имеет аппаратные и программные средства для построения микропроцессорных систем. Так, становятся возможными архитектуры типов SIMD (от англ. Single Instruction Multiple Data stream), MISD (от англ. Multiple Instruction Single Data stream) и MIMD (от англ. Multiple Instruction Multiple Data stream).

Принцип функционирования МП. МП работает, выполняя т. н. циклы инструкций — последоват. извлечения из памяти (ОЗУ, ПЗУ) инструкций, управляющих работой МП, их анализ и исполнение. При этом в начале цикла МП обращается к памяти один раз для чтения инструкции, а затем при необходимости ещё неск. раз для чтения (записи) данных из памяти или ввода-вывода данных через устройство ввода-вывода информации (УВВ).

В ОМП обычно используется одна и та же шина для обращения к памяти и УВВ (рис. 1, а), причём в один и тот же момент времени может читаться или записываться только одна инструкция или слово данных, т. е. инструкция и данные обрабатываются последовательно (рис. 1, б).

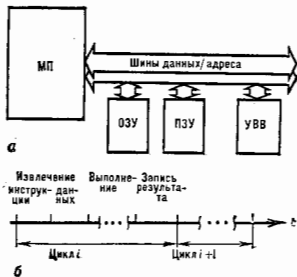


Рис. 1. Архитектура (а) и временная диаграмма шины инструкций (б) однокристального микропроцессора.

В СМП шины данных (адреса) памяти, в  $k$ -ых хранятся микроинструкции, как правило, разделены

(рис. 2, а) и процесс выборки след. инструкции может быть совмещен во времени с исполнением текущей инструкции (рис. 2, б).

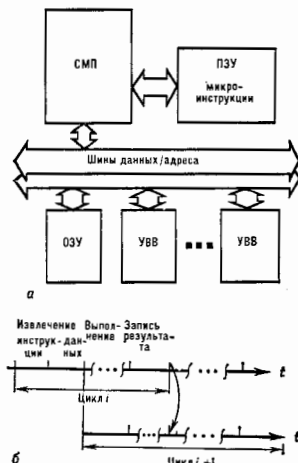


Рис. 2. Архитектура (а) и временная диаграмма цикла инструкции (б) секционного микропроцессора.

**Технология изготовления МП.** При произ-ве МП используются все известные виды технологий (ТЛШ, ТТЛШ, ИЛ, ИЛД, ЭСЛ, н-МОП, к-МОП и р-МОП [3—4]), дающие разл. выходные характеристики МП. Так, технология ТЛШ позволяет получить быстродействующие МП с высокой радиац. стойкостью, но имеющие большую потребляемую мощность и невысокую степень интеграции, технология н-МОП обеспечивает высокую степень интеграции при умеренной мощности потребления, но низкую радиац. стойкость. Высокими потребительскими свойствами обладают МП, изготовленные по технологии к-МОП на подложке из санфира, а изготовленные по технологии р-МОП имеют низкую себестоимость, но обладают небольшим быстродействием.

**Универсальные и специализированные МП.** Универсальный МП представляет собой многофункциональный БИС или их набор с программируемой логикой работы. Из-за своей универсальности он зачастую имеет низкую эффективность использования в разл. областях применения из-за несоответствия архитектуры МП характеру задач.

Альтернативой ему в этом отношении является специализирован. МП, архитектура к-рого полностью ориентирована на решение конкретной задачи. Появление таких МП стало возможным благодаря технологии произ-ва БИС на базе вентиляльных матриц или базовых матричных кристаллов, когда один или неск. нижних слоев БИС являются неизменяемыми, а меняется лишь верх. слой (слои) [5].

**Специализирован. МП** развиваются по пути создания МП, реализующих след. алгоритмы обработки данных (алгоритмич. МП). Для традиц. архитектуры первыми шагами в этом направлении стала разработка МП с сокращенным набором инструкций (RISC) и МП с набором инструкций языков программирования высокого уровня.

**Алгоритмич. МП** — по сути развитие указанных направлений. Напр., применительно к задачам физики создаются алгоритмич. МП, служащие для обработки изображений и речи, цифровой фильтрации сигналов (систольа. ЭВМ) [5], а также МП для аналитич. вычислений, реализации метода наим. квадратов, линейного программирования, работы с фактографич. базами данных и др.

Среди специализирован. МП можно выделить МП для обработки сигналов (сигнальные МП), к-рые по сути дела являются алгоритмич. МП, обрабатывающими информацию, заданную не в цифровом виде. При этом перед началом её цифровой обработки МП преобразует эту информацию в цифровой вид (напр., аналоговый сигнал — с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя). В случае аналоговых входных сигналов обрабатывающий их специализирован. МП наз. аналоговым МП [4]. Они могут выполнять функции любой аналоговой схемы (усиление сигнала, модуляцию, смещение, фильтрацию и др.) в реальном масштабе времени. При этом применение аналогового МП значительно повышает точность обработки сигналов, их воспроизводимость, расширяет функциональные возможности обработки сигналов за счёт цифровых методов.

Прогресс в развитии МП будет определяться как новыми микроэлектронными технологиями их изготовления, так и новой архитектурой МП, реализующей разл. способы обработки информации: параллельную, ассоциативную и др. Причём поскольку технология в ближайшие годы позволит достигнуть предела по параметру плотности логич. вентиля на кристалл (определяется межэлектронными размерами кристалла), на первое место выйдет разработка новых принципов обработки информации и архитектуры МП.

Лит.: 1) К л и в г м а н Э., Проектирование микропроцессорных систем, пер. с англ., М., 1980; 2) Соучеи В., Микропроцессоры и микро-ЭВМ, пер. с англ., М., 1979; 3) Фауладжер Р., Программирование встроенных микропроцессоров, пер. с англ., М., 1985; 4) Микропроцессоры, под ред. Л. И. Прескухина, т. 1—3, М., 1986; 5) Х в о л с т Г., В и р д л и н с к и й Н. В., П о л о в Е. А., Микропроцессоры и микро-ЭВМ в системах автоматического управления. Справочник, Л., 1987; 6) К о у л В., Активное развитие векторов нестандартных микропроцессоров, «Электроника», 1987, т. 60, № 21, с.45.

**МИКРОСКОП** оптический (от греч. mikrós — малый и skopéō — смотрю) — оптич. прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов (или деталей их структуры), не видимых невооруженным глазом. Разл. типы М. предназначаются для рассматривания, изучения и измерения микроструктуры органич. клеток, бактерий, срезов тканей, микрокристаллов, волокон, минералов, микроскопс и др. объектов, размеры к-рых меньше мин. разрешения глаза (см. *Разрешающая способность*), равного 0,1 мм. М. даёт возможность различать структуры с расстоянием между элементами до 0,2 мкм. Обычно М. имеет двухступенчатую систему увеличения, образованную объективом и окуляром и обеспечивающую увеличение до 1500 крат. В оптич. схему М. входят также элементы, необходимые для освещения объекта.

**Историческая справка.** Простой одноклиновый М. (луна с сильным увеличением) был известен уже в сер. 15 в. А. Левенгук (A. Leeuwenhoek) довёл увеличение простого М. до 300 крат и впервые обнаружил и описал мир микроскопич. организмов, в т. ч. бактерий. Изобретение сложного М., состоящего из двух положительных (собирающих) линз, относят к периоду между 1590 и 1610 и связывают с именем Г. Янсена (H. Jansen). В 1610 Г. Галилей (G. Galilei) на основании изобретённой им зрительной трубы построил др. тип М., состоящий из собирательного объектива и рассеивающего окуляра. Сложные М. позволили удалить препарат от глаза и устанавливать его в удобном положении. Долгое время сложные М. из-за присущего им

хроматизма уступали по качеству изображения простам.

Первые расчёты ахроматич. объективов для М. были выполнены Л. Эйлером (L. Euler) в 1750—70; по расчётам Ф. У. Т. Эпинуса (F. U. T. Aepinus) в 1805—08 был построен М., обеспечивающий увеличение до 180 крат. Э. Аббе (E. Abbe) разработал (1872—73) дифракц. теорию образования изображений несамосветящихся объектов в М., определял предел разрешения М. и показал при этом роль апертуры, рассчитал высококачеств. ахроматич. и апохроматич. объективы. Его теория лежит в основе совр. микроскопостроения. Л. И. Мандельштам распространил теорию Аббе на самосветящиеся объекты.

Принцип действия М. поясняет рис. 1, на к-ром представлена оптич. схема типичного М. проходящего света. Препарат 7 (стрелочка) находится на предметном столике перед микрообъективом 8 на расстоянии, несколько большем его фокусного расстояния  $F_{об}$ . Объектив образует действительное, увеличенное и перевёрнутое изображение 7' в плоскости полевой диафрагмы 10, лежащей за передним фокусом  $F_{ок}$  окуляра 11. Это промежуточное изображение рассматривается через окуляр, к-рый даёт дополнит. увеличение и образует мнимое изображение 7'' на расстоянии наилучшего видения  $D = 250$  мм. При этом па сетчатке глаза образуется действит. изображение предмета. Если окуляр сдвинуть так, чтобы изображение 7' оказалось перед передним фокусом окуляра, даваемое окуляром, становится действительным и его можно получить на экране или фотоплёнке (см. *Микропроекция*). Общее увеличение М. равно произведению увеличений объектива и окуляра:  $\Gamma_M = \beta_{об} \cdot \beta_{ок}$ , причём  $\beta_{об} = \Delta / f'_{об}$ ,  $\beta_{ок} = 250 / f'_{ок}$ , где  $\Delta$  — расстояние от заднего фокуса объектива до переднего фокуса окуляра (т. е. оптич. длина тубуса),  $f'_{об}$  и  $f'_{ок}$  — фокусные расстояния объектива и окуляра. Обычно объективы М. имеют увеличения от 6,3 до 100, а окуляры от 7 до 15; поэтому общее увеличение М. лежит в пределах от 44 до 1500.

Осветительная система М. состоит из лампы 1, коллектора 2, плоского зеркала 4 и конденсора 6. С плоскостью препарата 7 сопряжены полевая диафрагма окуляра 10 и полевая осветит. диафрагма 3, обычно регулируемая. Копус лучей, к-рый может быть воспринят объективом, ограничивает апертурная диафрагма 9, с к-рой сопряжены рисовая диафрагма 5, наз. апертурной осветит. диафрагмой, и нить лампы накаливания 1. При таком расположении источника

света и диафрагм обеспечивается равномерное освещение поля зрения даже при крайне неоднородной яркости источника. Кроме того, регулировкой полевой и апертурной осветит. диафрагм устраняется излишний свет, к-рый, не участвуя в формировании изображения, снижает контраст за счёт рассеяния на элементах конструкции М.

Разрешающая способность М., т. е. его способность давать раздельные изображения двух соседних точек объекта, ограничена дифракцией света, в результате к-рой изображение бесконечно малой светящейся точки имеет вид яркого пятна (диск Эри) с концентрич. тёмными и светлыми кольцами постепенно убывающей яркости. Диаметр диска Эри, в к-ром сосредоточено 84% всей энергии точки, имеет величину  $d_0 = 1,22 \lambda / A$ , где  $\lambda$  — длина волны света,  $A = n \sin u$  — числовая апертура,  $n$  — показатель преломления среды, находящейся между предметом и объективом,  $u$  — угол между оптич. осью и крайним лучом, попадающим в объектив из препарата, т. е. апертурный угол.

Предел разрешения М. определяется при сближении точек до такого расстояния, когда падение освещённости в промежутке между ними становится незаметным для глаза и точки сливаются в одну (рис. 2). Ус-

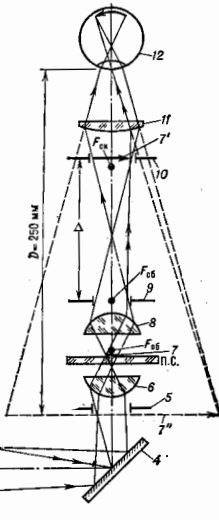


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема микроскопа.



Рис. 2. Слияние изображений двух точек по мере их сближения: а — безусловное разрешение ( $r = \lambda/A$ ); б — предельное разрешение ( $r = 0,5\lambda/A$ ).

тановить однозначно этот предел трудно. Чаще всего для его определения используется критерий Рэля, в соответствии с к-рым точки считаются разрешёнными, когда расстояние между ними равно радиусу диска Эри:  $r_0 = 0,61 \lambda / A$ . При этом в случае самосветящихся некогерентных излучателей освещённость в промежутке между точками составляет ~80% от освещённости в максимуме. Человеческий глаз может замечать контраст в освещённости до 4%; этому соответствует мин. расстояние, разрешаемое в М.,  $\delta = 0,8r_0 = 0,5 \lambda / A$ . Когерентные излучатели на таком расстоянии не разрешаются и для получения 20% контраста должны быть установлены на расстоянии  $r = 0,84 \lambda / A$ . Как показал Д. С. Рождественский, в М. освещение объекта следует считать частично когерентным. Оно зависит от отноше-

ния апертур конденсора и объектива; обычно освещит. апертура устанавливается равной  $\frac{1}{2}$  апертуры объектива, при этом освещение приближается к некогерентному. Для несомасштавлих объектов предельная разрешимость  $\delta_{пр} \sim \lambda/(A + A')$ , где  $A'$  — числовая апертура конденсора.

Разрешающая способность  $M$ . ( $\sim 1/\delta_{пр}$ ) прямо пропорциональна апертуре объектива, и для её повышения пространство между объективом и предметом заполняется жидкостью с большим ( $n > 1$ ) показателем преломления (см. *Иммерсионная система*). Макс. апертура «сухих» объективов  $A \approx 0,95$ ; апертура объективов с масляной иммерсией может быть доведена до 1,4. При этом в видимой области возможно разрешение структур с расстоянием между элементами  $\sim 0,2$  мкм.

Существование предела разрешающей способности влияет на выбор увеличения  $M$ . Увеличение  $M$ . в пределах 500—1000  $A$  наз. полезным, т. к. при нём глаз различает все элементы структуры объекта, разрешаемые  $M$ . Более слабые увеличения не позволяют выявить все детали, а большие увеличения бесполезны, т. к. никаких новых подробностей структуры не выявляют. Однако иногда такие увеличения применяют в микрофотографии, при микропроецировании.

Глубина резкого изображения  $M$ ., характеризующая возможные пределы продольного перемещения бесконечно тонкого объекта без заметного ухудшения резкости, складывается из волновой глубины  $T_w = n\lambda/2A^2$  ( $n$  — показатель преломления объекта), обусловленной дифракц. размытием точки вдоль оптич. осн. и геом. глубины  $T_g = 1000/7A\Gamma_m$ , связанной с конечной остротой зрения наблюдателя ( $\sim 2'$ ). Напр., если  $n = 1,5$ ,  $A = 1,0$ ,  $\lambda = 0,55$  мкм,  $\Gamma_m = 1000$ , то  $T_w = 0,41$  мкм,  $T_g = 0,14$  мкм и глубина резкого изображения  $M$ .  $T = 0,55$  мкм.

Как показал Аббе, степень подобия изображения в  $M$ . самому объекту зависит от апертуры объектива. Если объект — дифракц. решётка  $PQ$  (рис. 3), освещённая параллельным пучком света, то дифрагиров. волны образуют в плоскости апертурной диафрагмы  $aa'$  объектива дифракц. (пространств.) спектры объекта

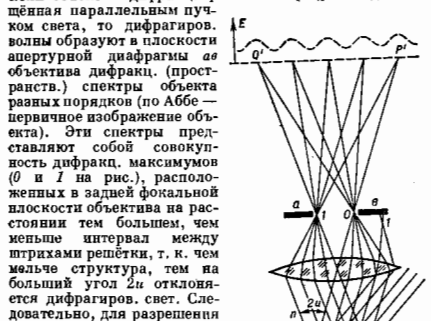


Рис. 3. Схема образования изображения несомасштавлих объектов по Аббе. Вверху — распределение освещённости в плоскости изображения; 0, 1 — дифракционные максимумы;  $aa'$  — апертурная диафрагма.

мелких структур нужна большая апертура. Изображение решётки  $P'Q'$  в плоскости увеличенного изображения (по Аббе — вторичное изображение) возникает в результате интерференции пучков света, исходящих из дифракц. максимумов разных порядков. Получаемое изображение тем ближе к оригиналу, чем больше максимумов участвует в формировании изображения. В

частном случае, когда расстояние между штрихами меньше предела разрешения  $M$ ., то угол  $2\alpha$  такой большой, что боковые максимумы не проходят через вращок объектива (апертуру) и в плоскости изображения вместо периодич. структуры наблюдается равномерно освещённое поле.

Основные механические и оптические узлы  $M$ . показаны на рис. 4, где изображён разрез упрощённого биол.  $M$ . Штатив  $M$ . имеет предметный столик 6, под

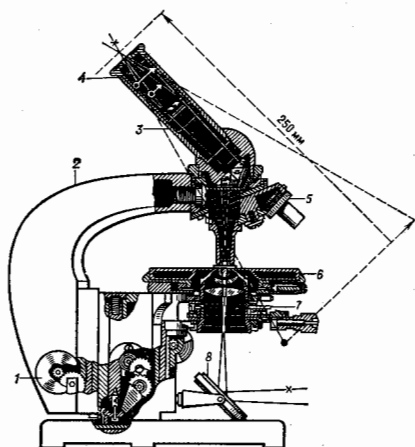


Рис. 4. Разрез биологического микроскопа и ход лучей: 1 — микрометр; 2 — тубусодержатель; 3 — тубус; 4 — окуляр; 5 — объектив; 6 — предметный столик; 7 — конденсор; 8 — зеркало.

к-рым находится конденсор 7. Тубусодержатель 2 несёт тубус 3 с окуляром 4 и револьвер с объективом 5. Фокусировка  $M$ . производится передвижением тубусодержателя с помощью грубого и микрометричного механизма  $I$ . Зеркало 8 направляет свет в конденсор  $M$ ., к-рый в зависимости от выбранного метода наблюдения может быть светолопльным, темнопольным или фазово-контрастным (см. *Микроскопия*).

Микрообъективам по степени исправления хроматич. аберрации разделяются на ахроматы, у к-рых исправлена хроматич. аберрация для двух длин волн и остаётся небольшая окраска изображения, и апохроматы, у к-рых хроматич. аберрация исправлена для трёх длин волн и к-рые дают бесцветное изображение объекта. Существуют также суперапохроматы — линзовые системы, ахроматизованные одновременно в УФ-и видимой областях спектра (250—700 нм). Планахроматы и планапохроматы имеют плоское поле зрения, что особенно важно для микрофотографии. Кроме того, микрообъективы различаются: по длине тубуса, по к-рую оял рассчитаны, — на тубусы 160 мм, 190 мм и «бесконечность» (объективы последнего типа переносятся в  $M$ . совместно с дополнит. линзой, к-рая превращает изображение из бесконечности в фокальную плоскость окуляра); по среде между объективом и препаратом — на сухие и иммерсионные системы разл. типов: водные, глицериновые, масляные и т. д.; по методу наблюдения — на обычные и фазово-контрастные; по типу препарата — на покровным стеклом и без него и т. д. Разл. приспособления к  $M$ . позволяют улучшить условия наблюдения и расширить возможности исследования.

**Типы М.** определяются либо областью применения, либо методом исследования. В зависимости от круга решаемых задач М. могут быть учебными, рабочими, лабораторными, исследовательскими, универсальными. В набор простых моделей имеется, как правило, ограниченный набор окуляров и объективов; в сложных моделях М. применяют широкий набор наб. совершенной оптики (аплаохроматы), имеются штатив жесткой конструкции, встроенный осветитель, предметный стол с двухкоординатным перемещением препарата, приспособления для разл. взаимодополняющих методов исследования, устройства для микрофотографии, микрофотометрия и др.

**Биологические М.** предназначены для исследования в микробиологии, гистологии, цитологии и т. д., а также используются для наблюдения прозрачных объектов в химии, физике, минералогии и т. п. Препарат при этом заключается, как правило, между покровным и предметным стеклами стандартных размеров. В биол. исследованиях используется также люминесцентный М. для наблюдения микрообъектов в свете их люминесценции. Оптик. схема люминесцентного М. отличается от обычной схемой выбором источника света и установкой светофильтров в осветит. системе и после объектива. Первый светофильтр выделяет ту область спектра излучения источника, к-рая возбуждает люминесценцию самого объекта или спец. красителя, к-рым обработан объект; второй светофильтр пропускает только свет люминесценции. Люминесценция мн. объектов возбуждается УФ или КВ частью видимого спектра, и поэтому источниками света в люминесцентных М. служат ртутные лампы. В инвертированных М. объектив располагается под наблюдаемым объектом, а конденсор сверху. Эти М. предназначены для исследования культуры тканей, находящихся в спец. сосудах с питат. средой. Металлографические М. используются для исследования микроструктуры металлов и др. неорганических объектов. Образцы металла — шлифы — предварительно полируются и протравливаются, благодаря чему зёрна структуры становятся отличными друг от друга по отражению. Поляризационные М. применяются для исследования в поляризов. свете анизотропных объектов: минералов, огнеупорных и текстильных материалов, биол. препаратов и пр. Проходя через эти объекты, поляризов. свет претерпевает изменение, по к-рым можно судить об он. оптич. характеристиках микрообъектов: кол-ве оптич. осей и их ориентации, силе двойного лучепреломления, вращения плоскости поляризации, плеохроизме. В отличие от обычного М. в осветит. системе поляризатор, М. установлен подризатор, а после объектива — анализатор. Стереомикроскопы благодаря возможности получения объёмных изображений служат для проведения препаративных работ в биологии и выполнении технол. операций в микроэлектронике. В офтальмологии, отоларингологии и др. при микрохирургии, операциях применяются стереомикроскопы спец. конструкции. Измерительные М. используются в машиностроении для точных измерений линейных размеров объекта. При этом возможны два способа измерений: 1) измеряется непосредственно величина изображения объекта в фокальной плоскости окуляра с помощью шкалы или винтового окулярного микрометра, а затем по известному значению увеличения М. вычисляется измеряемое расстояние на объекте; 2) М. используется для наводки на интересующее места объекта, а расстояние между ними определяется по отнот. перемещению М. и объекта.

Существует также много типов специализированных М. или установок, построенных на базе М.: УФ- и ИК-микроскопы — для проведения исследований за пределами видимой области спектра; микроустановки для съёмки движения микроорганизмов, процесса деления клетки, роста кристаллов; высокотемпературные М. для ис-

следования металлов, нагретых до 2000 °С; М. с дистанц. управлением для исследования радиоакт. материалов; интерферент. М. — для исследования фазовых объектов в проходящем и отражённом свете; М. для изучения следов элементарных частиц в толстослойных ядерных эмульсиях; проекц. М. для получения на экране изображений микропрепаратов; М. для проведения разл. видов спектрального анализа в проходящем и отражённом свете, в свете флуоресценции, комбинац. рассеяния, эмиссии; М.-фотометры (в т. ч. сканирующие, цитофотометры), М.-микродиффуриметры, М.-микроспектрофотометры и т. д.

**Лит.**: Михалев К., Основы теории микроскопа, пер. с нем., М., 1955; Франсон М., Фазово-контрастный и интерференционный микроскопы, пер. с франц., М., 1960; Чурловский В. Н., Теория оптичных приборов, М., 1961; 1968; Микроскопы, под ред. Н. И. Подкова, Л., 1969; Фиди Л. А., Барский И. Я., Микрофотография, Л., 1971; Агроскин Л. С., Папаян Г. В., Цитофотометрия, Л., 1977.

Г. В. Попов.

**МИКРОСКОП АКУСТИЧЕСКИЙ** — см. *Микроскопия акустическая*.

**МИКРОСКОПИЯ оптическая** — совокупность методов наблюдения и исследования с помощью оптич. микроскопа.

Структуру любого объекта (препарата) можно различить, если разные его частицы по-разному поглощают и отражают свет либо отличаются одна от другой (или от среды) показателями преломления. Эти различия обуславливают разницу амплитуд или фаз световых волн, прошедших через разные участки препарата, от чего, в свою очередь, зависит контрастность изображения. В зависимости от свойств изучаемого объекта и задач исследования существуют разл. методы наблюдения, дающие несколько отличающиеся изображения объекта (рис. 1).

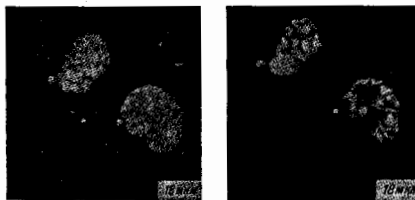
**Метод светлого поля в проходящем свете** (см. рис. 1 в ст. *Микроскопия*) наиб. распространён. Он используется для исследования прозрачных объектов с включёнными в них абсорбирующими частями и деталями. Пучок света, проходя через неоглощащие зоны препарата, даёт равномерно освещённое поле. Абсорбирующая частица на пути пучка света частично поглощает его, частично рассеивает, вследствие чего амплитуда прошедшего через частицу света будет меньше и частица выгядит на светлом фоне тёмным пятном (рис. 1, а). Контраст изображения микроструктуры объекта тем больше, чем большим поглощением в видимой области спектра обладает абсорбирующая частица. Биол. объекты, в большинстве своём не обладающие этим свойством, предварительно окрашиваются спец. красителями.

**Метод тёмного поля в отражённом свете** применяют для наблюдения непрозрачных объектов, напр. шлифов металлов, слитков, рудных минералов. Структура препарата видна вследствие различия отражательной способности его элементов. Препарат 1 (рис. 2) освещается через объектив 2 (выполняющий одновременно роль конденсора) с помощью opak-иллюминатора, в к-ром устанавливается полупрозрачная пластинка 3 или призма 4.

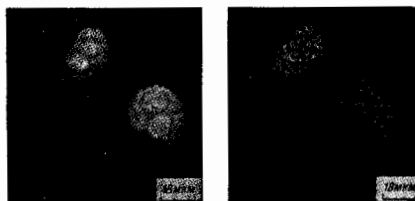
**Метод тёмного поля в проходящем свете** применяют в биологии, гл. обр. для наблюдения прозрачных неабсорбирующих объектов, невидимых при методе светлого поля, напр. бактерий. Пучок лучей (рис. 3), освещающий препарат 2, выходит из конденсора 1 спец. конструкции (конденсор тёмного поля) в виде полого конуса и непосредственно в объектив 3 не попадает. Изображение создаётся только светом, рассеянным элементами структуры препарата, к-рые отличаются от окружающей среды показателем преломления. В поле зрения микроскопа на тёмном фоне видны светлые изображения деталей (рис. 1, в). Этим методом по виду изображения нельзя определить, прозрачны частицы или непрозрачны, больший или меньший показатель преломления они имеют по сравнению с окружающей средой.



а б

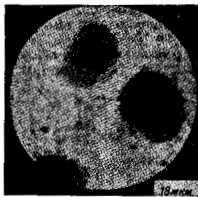


в г



д е

Рис. 1. Микрофотографии живых клеток печени мыши, полученные различными методами исследования: а — светлое поле; б — фазовый контраст; в — интерференционный контраст; г — темное поле; д — флуоресценция (окрасна акридиновым окрашиванием); е — поляризованный свет, ж — ультрафиолетовые лучи.



ж

Метод ультрамикроскопии, основанный на том же принципе (освещение препарата в ультрамикроскопах проводится перпендикулярно направлению наблюдения), даёт возможность при использовании ярких источников света обнаруживать частицы, размеры которых лежат далеко за пределами разрешения наиб. сильных микроскопов (до 0,002 мкм). При этом, однако, изображенные частицы имеют вид дифракц. точек, что не позволяет делать вывод об их истинной форме.

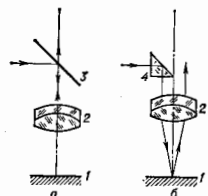


Рис. 2. Метод светлого поля в отражённом свете а — с полупрозрачной пластинкой 3; б — конденсор; 2 — препарат; с — призмой 4; 1 — препарат; 2 — объектив.

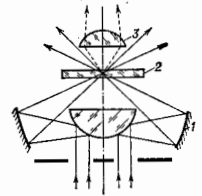


Рис. 3. Метод тёмного поля в отражённом свете (рис. 4) осуществляется при освещении препарата 1 (напр., шлифа металла) сверху с помощью зеркала 4 и спец. кольцевой зеркальной системы 3, расположенной вокруг объектива и называемой эпиконденсором. Изображение 1' здесь создаётся только лучами, рассеянными объектом (пушистые линии).

Метод тёмного поля в отражённом свете (рис. 4) осуществляется при освещении препарата 1 (напр., шлифа металла) сверху с помощью зеркала 4 и спец. кольцевой зеркальной системы 3, расположенной вокруг объектива и называемой эпиконденсором. Изображение 1' здесь создаётся только лучами, рассеянными объектом (пушистые линии).

Фазово-контрастный М. используется для наблюдения прозрачных не поглощающих объектов, к-рые отличаются от окружающей среды показателями преломления или толщиной. Вследствие этого различия световая волна, прошедшая сквозь объект,

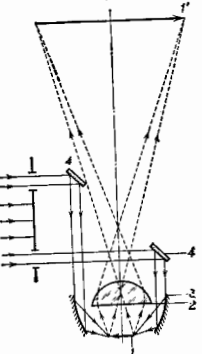


Рис. 4. Метод тёмного поля в отражённом свете: 1 — препарат; 2 — объектив; 3 — эпи-конденсор; 4 — кольцевое зеркало.

претерпевает изменения по фазе и приобретает т. п. фазовый рельеф. Фазовые изменения, не воспринимаемые непосредственно глазом или фотопластинкой, с помощью спец. фазовой пластинки (фазового кольца) переводят в амплитудные изменения (амплитудный рельеф), воспринимаемые глазом как изменения интенсивности. Препарат 3 в фазово-контрастном микроскопе (рис. 5) освещает-

Рис. 5. Метод фазового контраста в проходящем свете: 1 — апертурная диафрагма; 2 — конденсор; 3 — препарат; 4 — объектив; 5 — фазовая пластинка; 6 — изображение.

ся через кольцевую апертурную диафрагму 1, установленную в переднем фокусе конденсора 2. Изображение её получается в заднем фокусе объектива 4, где помещается прозрачная пластинка 5 с фазовым кольцом, размеры которого равны размерам изображения диафрагмы. Фазовое кольцо представляет собой выгнутую в пластинке канавку или нанесённую на неё тонкую плёнку.

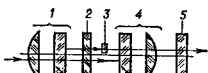
Регулярный свет, прошедший через фазовое кольцо, сдвигается по фазе на  $\pi/2$  (сплошные линии), а свет, дифрагировавший на объекте, не попадает в кольцо и

не получает этого доплат. двига по фазе (пунктирные линии). С учётом фазового сдвига, внесённого самим объектом, разность фаз между регулярной и дифрагировавшей волнами оказывается близкой к 0 или  $\pi$ , и эти волны интерферируют. В результате в плоскости  $b$  формируется контрастное изображение объекта, в  $k$ -ром распределение освещённости (рис. 1, б) приблизительно соответствует изменению показателя преломления (или толщины объекта). При малой разности фаз в объекте регулярные и дифрагированные лучи сильно отличаются друг от друга по амплитуде. Поэтому для повышения контраста на фазовое кольцо наносится доплоток, поглощающее покрытие.

Метод фазового контраста широко используется при исследовании живых объектов, для  $k$ -рых окрашивание губительно. Он применяется также в отражённом свете для изучения микронеровностей, загрязнений, нарушений структуры на полированных металлах, образцах.

Метод интерференционного контраста состоит в том, что каждый луч, входящий в микроскоп, разделяется: один проходит сквозь наблюдаемую частицу, второй — мимо. В окулярной части микроскопа оба луча вновь соединяются и интерферируют между собой. Результат интерференции определяется разностью хода лучей  $\Delta$ ,  $k$ -рая выражается  $F$ -флой  $\Delta = N\lambda = (n_0 - n_c)d$ , где  $n_0, n_c$  — показатели преломления объекта и окружающей среды,  $d$  — толщина объекта,  $N$  — порядок интерференции,  $\lambda$  — длина волны. Принципиальная схема одного из способов осуществления интерференц. контраста показана на рис. 6. Конденсор  $I$  и объектив  $\neq$  снабжены двоякопреломляющими пластинками (помечены на рис. диагональными стрелками), первая

Рис. 6. Метод интерференционного контраста: 1 — конденсор; 2 — среда, в которой находится объект 3; 4 — объектив; 5 — конденсатор.



из  $k$ -рых расщепляет исходный световой луч на два луча, а вторая воссоединяет их. Один из лучей, проходя через объект 3, запаздывает по фазе (приобретает разность хода по сравнению со вторым лучом, проходящим только через среду 2); величина этого запаздывания измеряется конденсатором 5. Метод интерференц. контраста в не $k$ -рых отношениях сходен с методом фазового контраста: оба они основаны на интерференции лучей, прошедших через микрочастицу и миновавших её. Отличие интерференц. метода от метода фазового контраста заключается гл. обр. в возможности, используя конденсаторы, с высокой точностью (до  $\lambda/300$ ) измерять разности хода, вносимые микробином. На основании этих измерений можно производить количественные расчёты, напр. общей массы и концентрации сухого вещества в клетках биол. препаратов. В интерференц. микроскопах также отсутствуют ореолы, сопровождающие фазово-контрастное изображение; такие микроскопы позволяют выявить участки объекта как с малыми, так и большими градиентами показателя преломления или толщины (рис. 1, в). Однако эти микроскопы существенно сложнее фазово-контрастных в производстве и эксплуатации.

Принцип интерференц. М. примерно как  $k$  проходящему, так и  $k$  отражённому свету. На рис. 7 показана схема микроинтерферометра Линника, предназначенного для изучения непрозрачных объектов. Свет от источника 1, пройдя коллиimator 2, разделяется на пластинке 3 на два пучка равной интенсивности. Пучок сравнения фокусируется объективом  $b$  на эталонном зеркале 7, а идентичный объектив 8 фокусирует второй пучок на поверхности исследуемого объекта 9. После отражения от зеркала и образца пучки возвращаются обратно по тем же путям, соединяются на пластинке 3 и интерферируют в фокальной плоскости линзы 4, сопряжённой с плоскостью объекта. Изображение предмета и

интерференц. картина рассматриваются через окуляр 5. Форма интерференц. полос, наблюдаемых на изображении поверхности, повторяет профиль этой поверхности, что даёт возможность исследовать её шероховатости,

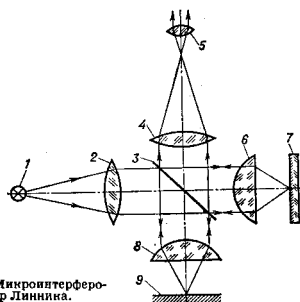


Рис. 7. Микроинтерферометр Линника.

определять толщину плёнок, глубину канавок с погрешностью 0,01—0,02 мкм. Высота неровности определяется по  $F$ -ле  $R = \lambda a^2/2b$ , где  $\lambda$  — длина волны света,  $b$  — ширина полос,  $a$  — величина их искривления при пересечении измеряемой поверхности.

В методе дифференциального интерференц. контраста (ДИК) оба луча проходят через один и тот же объект с небольшим боковым смещением. Наиб. распространение получил вариант ДИК по Помакову, в  $k$ -ром разделении и сведении пучков производится в поляризатор, свете с помощью спец. двоякопреломляющих призм, установленных соответственно перед конденсором и после объектива. Величина разведения пучков выбирается близкой к разрешающей способности микроскопа, чтобы не было заметно дублирование изображения. Изображение в ДИК отражает градиент разности оптич. пути в объекте в направлении разведения. Получаемое цветное изображение рельефно; в нём, так же как и в предыдущем случае, отсутствуют ореолы. Благодаря тому, что оба интерферирующих пучка проходят через один и те же оптич. элементы, устройства, реализующие ДИК, просты и удобны в обращении.

Поляризацонная М. используется для исследования анизотропных объектов в поляризован. свете (проходящем и отражённом). У прозрачных объектов во мн. случаях наблюдается интерференц. явления (см. Интерференция поляризованных лучей),  $k$ -рые изучаются либо в параллельных лучах (ортоскопия), либо в сходящихся лучах (коноскопия). При ортоскопич. ходе лучей

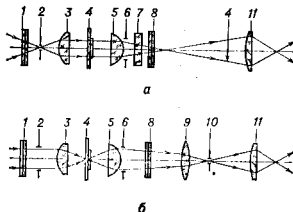


Рис. 8. Принципиальная оптическая схема поляризацонного микроскопа: а — для ортоскопического наблюдения; б — для коноскопического наблюдения; 1 — поляризатор; 2, 6 — диафрагмы; 3 — конденсор; 4 — препарат; 5 — объектив; 7 — конденсатор; 8 — анализатор; 9 — линза Вертмана; 10 — фокальная плоскость окуляра; 11 — окуляр.

(рис. 8, а) в фокальную плоскость окуляра II проектируется изображение 4' препарата 4. Наблюдаемая при этом интерференция поляризов. лучей локализована в плоскости препарата. Пучок лучей, прошедших через поляризатор I, ограничивается апертурой диафрагмы 2 конденсора 3; с помощью вогнутого анализатора 8 и конденсаторов разл. типов 7 производится измерение величин двойного лучепреломления, углов поворота плоскости поляризации, определение углов погасания и др. характеристик. При ковоископ. ходе лучей (рис. 8, б) апертурная диафрагма 2 открывается, а наблюдение интерференц. картины, локализованной в бесконечности, производится с помощью линзы Бертрана 9, к-рая проецирует выходной зрачок 6 в фокальную плоскость 10 окуляра. Получаемые при этом изображения дают возможность определить знак двойного лучепреломления, кол-во осей объекта, их ориентацию и величину угла между осями.

У непрозрачных объектов в поляризов. свете изучают двоякообразие и др. свойства. Наиб. распространение поляризац. М. получила в минералогии, петрографии и кристаллографии, но применяется также для изучения биол. объектов (рис. 1, е), в металлографии и т. д.

**Люминесцентная (флуоресцентная) М.** использует явление фотолюминесценции (см. *Люминесценция*), свойственное либо природе самого микрообъекта (в большинстве случаев биологического), либо полученное им после окраски спец. красителями — флуорохромами (вторичная люминесценция). При этом наблюдается цветная контрастная картина свечения, позволяющая выявить морфологич. и хим. особенности объектов (рис. 1, д). В люминесцентной М. обычно используется флуоресценция, имеющая короткое время затухания. Схема люминесцентного микроскопа отличается от схемы обычного микроскопа наличием двух светофильтров: в осветит. системе и после объектива. Первый выделяет возбуждающее излучение, а второй пропускает только свет флуоресценции.

**Ультрафиолетовая и инфракрасная М.** позволяют проводить исследования за пределами видимой области спектра. Для визуализации изображения используются электронно-опич. преобразователи, телевизионные системы, фотогр. устройства и др. УФ-М. (250—400 нм) применяется гл. обр. при исследовании окрашенных клеток и тканей, к-рые обладают выбират. поглощением в УФ-области (рис. 1, ж). ИК-М. (0,75—1,2 мкм) позволяет изучать внутр. структуру объектов, непрозрачных в видимом свете: нек-рых видов стекла, кристаллов, минералов.

**Стереоскопическая М.** позволяет видеть предмет объёмным за счёт рассматривания его каждым глазом под разными углами. В стереомикроскопах по схеме Грену (рис. 9) для этой цели служат две самостоят. опич. системы, образующие между собой угол 15°, что соответствует расстоянию конвергенции 250 мм. В однообъективных стереомикроскопах разные углы зрения для глаз образуются за счёт использования периферич. зон выходного зрачка. В приборах этого типа с помощью доплотит. опич. системы возможно получение ступенчатого или

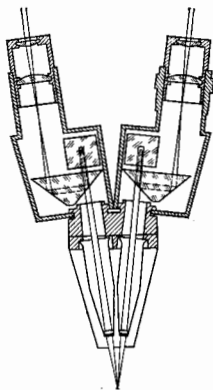


Рис. 9. Принципиальная схема стереомикроскопа по схеме Грену.

плавного изменения увеличения без замены объектива и окуляров. Типичный диапазон увеличений в стереомикроскопах от 4 до 100 крат при рабочем расстоянии ок. 100 мм.

**Контактная М.** предназначена для прижизненного исследования органов на клеточном уровне. Для этой цели разработаны спец. объективы с нулевым рабочим расстоянием. Они приводятся в контакт с исследуемой тканью, устраняют её микрорельеф и останавливают естеств. пульсации. Наблюдение проводится в свете флуоресценции или тёмном поле при освещении препарата через объектив.

**Телевизионная М.** позволяет наблюдать микрообъекты на телеэкране. Микроскопы этого типа могут быть построены на основе схемы с передающей трубкой либо схемы с бегущим лучом. В телевизионных микроскопах с передающей трубкой (рис. 10, а) препарат 3 освещается источником света I через конденсор 2. Микрообъекты 4 и окуляр 5



Рис. 10. Блок-схема телевизионного микроскопа: а — с передающей трубкой; б — с бегущим лучом.

электронную систему 7 на кинескоп 8, где преобразуется в видимое изображение. Если препарат освещает последовательно светом трёх длин волн или изображение одновременно проецировать на три передающие трубки через блок цветоделения, то, передав сигналы с трубок на трёхцветный кинескоп, можно получить на экране цветное изображение микрообъекта. В телевизионном микроскопе с бегущим лучом (рис. 10, б) используется опич. сканирование препарата движущимся лучом света. В этом случае микроскоп, состоящий из объектива 3 и окуляра 2, работает в обратном ходе лучей и проецирует на препарат 4 сильно уменьшенное изображение раstra катодолучевой трубки I, служащей источником раstra (источником света может быть и лазер с быстродействующим сканирующим устройством). Приёмником света является фотумножитель 6, установленный под конденсором 5. При такой схеме точки препарата освещаются последовательно по мере движения луча, а интенсивность прошедшего света пропорциональна пропусканию той точки препарата, где находится бегущий луч. Выходной сигнал с фотумножителя, пропорциональный интенсивности прошедшего света, пройдя через электронную систему 7, управляет током электронного луча кинескопа 8. В результате на экране кинескопа воспроизводится изображение препарата. Схемы с бегущим лучом дают возможность наблюдать в течение длит. времени живые клетки в УФ-лучах, поскольку на облучение каждой точки препарата затрачивается малая доля времени всего кадра.

Телевизионные микроскопы позволяют чисто электронным путём менять масштаб, контраст и яркость изображения. Достоинством телевизионной М. является возможность дистанционно наблюдать объекты (напр., радиоактивные).

**Конфокальная М.** реализует растровый способ построения изображения (см. *Растровые оптические системы*). При этом каждая точка объекта последовательно освещается малым (дифракционно ограниченным) источником излучения, а сигнал от неё детектируется с помощью точечного приёмника излучения. Это позволяет увеличить разрешающую способность в 1,4 раза и



получать тонкие высокочастотные оптические срезы объекта, на основе к-рых можно восстанавливать его объёмную структуру. Микроскопы этого типа могут быть построены на основе схем с лазерным сканированием и диафрагмой, установленной перед ФЭУ (конфокальный лазерный сканирующий микроскоп), либо схем с диском, в к-ром имеются наборы сопряжённых диафрагм, расположенных в осветительной и окулярной частях прибора (конфокальный микроскоп с tandemным сканированием).

**Аналитическая М.** включает в себя раал. методы качества и количества, определения состава вещества в отд. микроструктурах размером от долей мкм до долей мм на основании исследования их оптич. характеристик (см. *Спектральный анализ*). Среди методов количества анализа под микроскопом наиб. распространение получила цитофотометрия, позволяющая по поглощению определить концентрацию или кол-во внутриклеточных веществ до  $10^{-12}$ – $10^{-14}$  г.

**Микроскопия акустическая** — совокупность методов визуализации микроструктур и форм малых объектов с помощью УЗ- и гиперзвуковых волн. Она включает в себя также методы измерения локальных характеристик упругих и вязких свойств объекта и их распределений по его поверхности или внутри объёма. М. а. основана на том, что УЗ-волны, прошедшие, отражённые или рассеянные отд. частями объекта, имеют раал. характеристики (амплитуду, фазу и др.) в зависимости от локальных вязкоупругих свойств образца. Эти различия позволяют методами *визуализации звуковых полей* получать акустич. изображения на экране дисплея. В зависимости от способа преобразования акустич. полей в видимое изображение различают сканирующую лазерную М. а. и сканирующую растровую М. а.

**Сканирующая лазерная М. а.** представляет собой разновидность *голографии акустической*, предназначенную для визуализации малых объектов. При облучении плоской УЗ-волной объекта, помещённого в жидкость, фронт волны после прохождения образца искривляется из-за неоднородных фазовых задержек, а амплитуда изменяется в соответствии с неоднородностью коэф. отражения и поглощения в объекте. Промедляя и создаёт на ней поверхностный рельеф, соответствующий акустич. изображению объекта. Рельеф считается световым лучом и воспроизводится на экране дисплея. Этот метод реализуется в лазерном акустич. микроскопе (рис. 1), где УЗ-пучок, излучае-

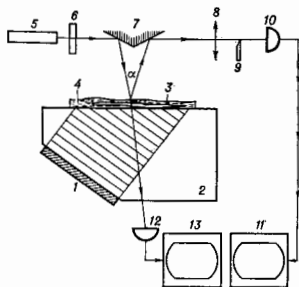


Рис. 1. Принципиальная схема сканирующего лазерного акустического микроскопа.

мый преобразователем 1, через звукопровод 2 падает на объект 3, помещённый в иммерсионную жидкость 4, и после прохождения объекта создаёт на границе жид-

кости рельеф. На поверхность жидкости нанесена полупрозрачная шёлка, к-рая деформируется вместе с поверхностью. Луч лазера 5 с помощью сканирующего устройства 6 и зеркала 7 перемещается по поверхности плёнки, частично отражаясь от неё. Угол отражения  $\alpha$  меняется от точки к точке в соответствии с рельефом, создаваемым акустич. волной. Отражённый луч, пройдя зеркало 7 и линзу 8, падает на оптич. нож 9, преобразующий угл. модуляцию в амплитудную, и регистрируется фотоприёмником 10. Видимое акустич. изображение возникает на экране дисплея 11, развёртка к-рого синхронизируется с движением лазерного луча, а яркость управляется сигналом с фотоприёмника. Для сравнения одновременно на другом дисплее 13 получается оптич. изображение объекта за счёт регистрации фотоприёмником 12 прошедшего лазерного луча.

Используемый в сканирующей лазерной М. а. способ визуализации не позволяет получать высокие разрешения. Лазерные акустич. микроскопы работают на частотах вплоть до неск. сотен МГц и дают разрешение до 10 мкм. Одно из достоинств лазерного акустич. микроскопа — возможность одновременно получать оптич. и акустич. изображения и сравнивать их. Для количества измерений в лазерной сканирующей М. а. используются те же методы, что и в обычной акустич. голографии, напр. метод интерферогр.

**В сканирующей растровой М. а.** сфокусированный УЗ-пучок перемещается по объекту, изображение к-рого воссоздается по точкам в виде раstra. Фокусирующ. волна, падая на образец, частично отражается от объекта, частично поглощается и рассеивается в нём, а частично проходит через него. Принимая ту или иную часть излучения, можно судить об акустич. свойствах образца в области, размеры к-рой определяются размерами фокального пятна. В акустич. микроскопе (рис. 2) пучок плоских УЗ-волн, получае-

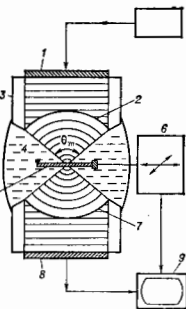


Рис. 2. Принципиальная схема сканирующего акустического микроскопа для режима «на проход».

тся приёмной акустич. линзой 7 на приёмном пьезоэлектрич. преобразователе 8. Электрич. сигнал с преобразователя управляет яркостью электронного луча, развёртка к-рого синхронизируется с движением образца при его сканировании. В результате на экране дисплея 9 возникает акустич. изображение, к-рое определяется распределением по образцу его физ. свойств (упругости, плотности, вязкости, толщины, анизотропии и др.).

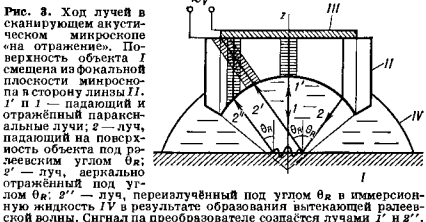
В зависимости от того, какая часть излучения после взаимодействия с объектом регистрируется, различают акустич. микроскопы «на отражение», «на прохождение», «тёмного поля». Выходной сигнал формируются лишь теми лучами, к-рые проходят через фокус приёмной линзы 7 в иммерсионной жидкости (реальной или мнимой) и соответственно после преломления на об-

поверхности падают на преобразователь по нормали. Поэтому для получения изображения в прошедших лучах используется т. н. кофокальная система — пара акустич. линз, фокусы к-рых совмещены, как показано на рис. 2. В режиме «на отражение» одна и та же линза используется как для получения фокусир. пучка, так и для приёма УЗ-волн. Акустич. изображение в режиме «тёмного поля» создаётся лучами, рассеянными объектом; для его получения приёмную линзу в кофокальной системе отклоняют от акустич. оси системы так, чтобы она собирала рассеянные лучи. Ещё один режим работы акустич. микроскопа — «великий» — можно осуществить, если принимать акустич. излучение не на ос. частоте возбуждаемого звукового пучка, а на её гармониках.

Звукопроводы акустич. линз изготавливаются из материалов с высокой скоростью продольных акустич. волн (сафир  $Al_2O_3$ , кварц и др.), в качестве иммерсионных жидкостей используются вода, жидкий гелий, жидкие металлы (ртуть, галлий и др.), нек-рые органич. жидкости. Показатели преломления  $n$  на границах раздела таких сред достигают значит. величины; так, для системы вода — сафир  $n = 7.4$ . Для того чтобы уменьшить потери на поглощение звука в иммерсионной жидкости и улучшить разрешение, используются линзы с малыми радиусами кривизны (вплоть до сотен и десятков микронов для гиперзвуковых частот) и большими углами раскрытия  $\theta_m$  (обычно  $\theta_m \sim 100^\circ - 120^\circ$ ). Вследствие большой разницы скоростей распространения в звукопроводе и в иммерсионной жидкости абберации в линзовых системах акустич. микроскопов малы даже при больших  $\theta_m$ . Структура фокуса определяется дифракц. эффектами, и размеры фокальной области оказываются порядка длины УЗ-волны  $\lambda$ . Разрешение акустич. микроскопа, характеризуемое радиусом фокального пятна  $a = 0.81 \cdot c/f \cdot \sin(\theta_m/2)$ , зависит от частоты  $f$ , на к-рой микроскоп работает. В диапазоне частот от 50 МГц до 3 ГГц разрешение в акустич. микроскопах, используемых в качестве иммерсии воду (скорость звука  $c \approx 1.5 \cdot 10^3$  см/с), меняется от 20 до 0,5 мкм, конкурируя на высоких частотах с разрешением оптич. микроскопов. Использование в качестве иммерсии сверхтекучего гелия при темп-рах ниже  $0.2^\circ K$  ( $c \approx 0.24 \times 10^3$  см/с) существенно улучшает разрешение микроскопа: уже на частоте 2 ГГц оно составляет ок. 90 нм.

Контраст акустич. изображений определяется вариациями разл. физ.-механич. свойств материала и геом. параметров образца в зависимости от режима работы микроскопа. Режим «на отражение» обычно используется для изучения поверхности и поверхностного слоя у хорошо отражающих твёрдых тел (кристаллов, шлифов минералов и сплавов и др.). При отражении сходящегося пучка с достаточно большим углом раскрытия  $\theta_m$  в жидкости помимо зеркально отражённых лучей распространяются также лучи, возникающие в результате возбуждения падающим пучком на границе раздела вытекающих поверхностей волн и боковых волн (волн в твёрдом теле, распространяющихся вдоль границы раздела и перераспределяющихся в жидкость — см. *Отражение звука*). В большинстве материалов скорость распространения поперечных акустич. волн заметно больше скорости звука в иммерсионной жидкости, и для них осн. роль играют эффекты, связанные с вытекающими *Рэлея волнами*, к-рые возбуждаются УЗ-волнами, падающими на границу раздела под т. н. рэлеевским углом  $\theta_R = \arcsin(c_R/c_L)$ , где  $c_R$  — скорость рэлеевской волны на свободной поверхности образца (рис. 3). При распространении вдоль границы раздела возбуждённая волна перераспределяется обратно в жидкость под углом  $\theta_R$  в виде семейства лучей, исходящих из разл. точек поверхности раздела. Когда поверхность образца *II* помещается в фокальную плоскость акустич. линзы *I*, выходящий сигнал на преобразователе *III* формируется только лучами, зеркально отражёнными от поверхности образца. Акустич. изображение передаёт

распределение на поверхности образца коэф. отражения, интергированное по углу падения. Из-за большой разницы *волновой сопротивлений* образца *I* и иммерсионной жидкости *IV* коэф. отражения близок к единице



даже при значит. изменениях упругих свойств образца, и контраст акустич. изображений слабый. Для улучшения контраста исследуемую поверхность смещают из фокальной плоскости по направлению к линзе. При её смещении выходящее электрич. напряжение  $V$  на преобразователе возникает как интерференция сигналов, создаваемых параксиальным отражённым лучом  $I'$  и лучом  $2''$ , перераспределённым вытекающей рэлеевской волной и проходящим через мнимый фокус в иммерсионной жидкости (рис. 3). Акустич. пути, проходимые лучами  $I'$  и  $2''$ , различны, и

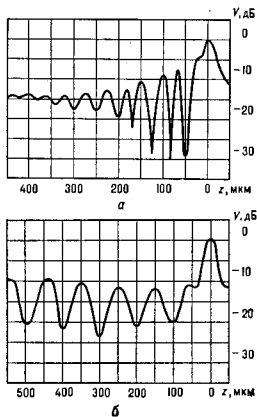


Рис. 4.  $V(z)$ -характеристика для  $\alpha$ -кварца У-среды (а) и сафира У-среды (б) с водой в качестве иммерсионной жидкости.

$$\Delta z = \frac{1}{2} \frac{c_R}{f} \frac{1 + \cos \theta_R}{\sin \theta_R}$$

Зависимость  $V$  от  $z$  определяется акустич. свойствами материала образца, поэтому она получила назв.  $V(z)$ -характеристики материала либо его акустич. сигнатуры. Подбором смещения  $z$  можно получить высокий акустич. контраст даже при небольших изменениях упругих параметров в образце делой, однако, уменьшения разрешающей силы микроскопа.

Поскольку в формировании выходящего сигнала в микроскопе при работе «на отражение» участвуют вытекающие рэлеевские волны, акустич. изображения передают структуру не только самой поверхности образца, но и поверхностного слоя, толщина к-рого определяется глубиной проникновения рэлеевской волны в образец,

Благодаря этому с помощью отражательной М. а. можно изучать многослойные плёнки и др. слоистые системы, визуализировать подповерхностные дефекты и микро-трещины и др. Визуализация внутр. структуры образца на больших глубинах затруднена эффектами отражения и преломления на его границе. Вследствие отражения лишь малая часть падающего излучения проходит внутри образца, а структура прошедшего пучка оказывается искажённой эффектами преломления: в образце возникает неск. сходящихся пучков, образованных упругими волнами разл. поляризаций (в изотропном образце — продольными и поперечными волнами), причём эти пучки имеют значит. aberrации за счёт изменения хода лучей при преломлении. Однако использование в качестве иммерсии жидкостей с большими волновыми сопротивлениями и скоростями звука (напр., жидкого галлия) позволяет уменьшить потери на отражение и aberrации и получить акустич. изображения внутр. структур образца как в продольных, так и в поперечных лучах.

Для визуализации тонких плоских образцов (плёнок, пластинок, срезов биол. тканей и др.) используется М. а. «на прохождении». Толщины образцов в этом случае ограничены величиной межлинзового расстояния в кофокальной системе, поглощением и aberrациями фокусиров. Уз-пучка в образце и обычно не превышают неск. десятков длин волн на рабочей частоте микроскопа. Контраст акустич. изображений для объектов с акустич. характеристиками, близкими к характеристикам иммерсии (напр., биол. объекты в воде), создается не только локальными вариациями поглощения и рассеяния в образце, но и неоднородным распределением скорости звука по образцу, поскольку лучи в сходящемся пучке, идущие под разл. углами к оси пучка, проходят в образце разные пути и приходят на приёмный преобразователь с разл. фазами. Поэтому сигнал на выходе оказывается зависящим от локальной скорости звука в образце.

М. а. позволяет непосредственно наблюдать микро-структуру объекта, распределение его упругих и вязких свойств. М. а. используется для получения изображений оптически непрозрачных объектов или, наоборот, прозрачных объектов с незначит. оптич. контрастом. Во мн. случаях получение акустич. изображений, в отличие от оптических, не требует спец. методов приготовления образцов [для биол. объектов — фиксация и окрашивание (рис. 5), для минералов и сплавов — травления (рис. 6) и др.] и позволяет непосредственно наблюдать динамику физ., физ.-хим. и биол. процессов

в образцах. М. а. применяется в материаловедении для изучения структуры минералов, сплавов и кристаллов, а также плёнок и разл. покрытий; для неразрушающего

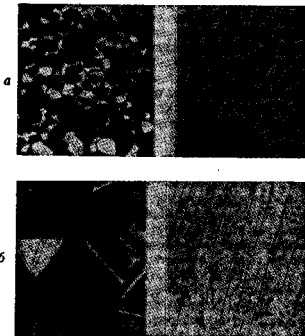


Рис. 6. Акустические (слева) и оптические (справа) изображения образцов: а — керамика (увеличение  $350\times$ ); б — аустенита (увеличение  $250\times$ ).

контроля изделий микроэлектроники; в биологии и медицине — для прижизненного изучения тканей и клеток и др.

М. а. используется также для количеств. измерений локальных модулей упругости материалов. Методом  $V(z)$ -характеристик в акустич. микроскопах «на отражение» измеряется локальная скорость резонансной волны в изотропных твёрдых телах. Измерения  $V(z)$ -характеристик с помощью цилиндрич. акустич. лизы позволяют определять скорости распространения поверхностных волн по разл. направлениям в анизотропных материалах и тем самым характеризовать локальную анизотропию этих материалов.

Лит.: В е р е в и н а С. И., Л и м о в В. Е., С о л о д о в И. Ю., Акустическая микроскопия, «Вестник МГУ. Сер. Физика, Астрономия», 1977, т. 18, № 1, с. 3; К е с с л е р Ж. У., Ю х а с Д. Э., Акустическая микроскопия, «ТИЭР», 1979, т. 67, № 4, с. 96; К у в и т К. Ф., А л т а л а р А., В и к р а м а с и т х е Х. К., Акустическая микроскопия с механическим сканированием. Обзор, там же, № 8, с. 5; L e m o n R. A., Q u a t e C. F., Acoustic microscopy, в кн.: Physical acoustics, v. 14, ed. by W. P. Mason, R. N. Thurston, in I. J., 1979.

В. М. Левин.  
**МИКРОТРОН** (от греч. *mikrós* — малый и *trōn* — циклич. резонансный ускоритель электронов с постоянным во времени ведущим магн. полем и пост. частотой ускоряющего СВЧ-поля. В классич. М. траектории ускоренных электронов составлены из ряда возрастающих по радиусу окружностей, соприкасающихся в общей точке, в к-рой расположена ускоряющая структура.

Принцип действия М. предложен в 1944 В. И. Векслером одновременно с описанием открытого им явления *автофазировки* частиц в резонансных ускорителях. Условие синхронизма для движущихся по разным орбитам электронов в М. состоит в том, что длина последоват. орбит отличается на целое число длин волн  $\lambda$  ускоряющего СВЧ-поля; поэтому М. часто назв. у с к о р и т е л е м с п е р е м е н н о й к р а т н о с т ь ю.

В классич. М. (рис., а) электроны ускорются в СВЧ-резонаторе, расположенном между полюсами пост. электромагнита (магн. диполя). Виду малой величины области фазовой устойчивости ( $\sim 32^\circ$ ) ускоренный пучок в М. имеет небольшой энергетич. разброс. Поперечная устойчивость движения частиц обеспечивается совместным действием ведущего магн. поля и ускоряющего СВЧ-поля резонатора.

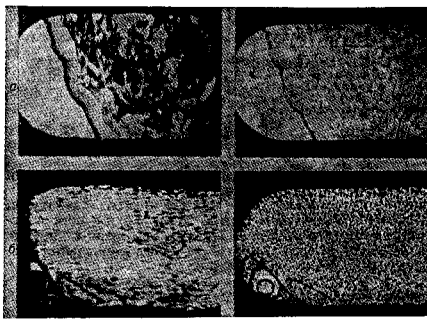
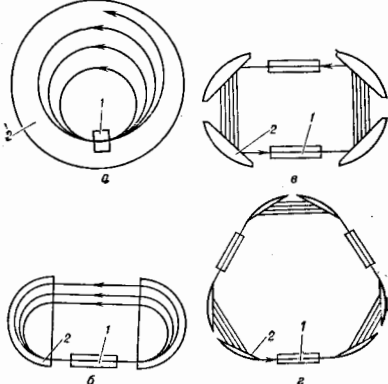


Рис. 5. Акустические (слева) и оптические (справа) изображения биологических образцов: поперечный срез кожи человека (а) и срез печени мыши (б).

Предельные значения энергии для классич. М. определяются точностью, с к-рой удаётся воспроизвести магн. поле, и составляют  $\sim 30$  МэВ при токах до 100 мА в импульсе. Коэф. заполнения пучком (отноше-



Схематическое изображение электронных рециркуляторов, основанных на микротронном принципе ускорения: а — классический микротрон; б — разрезной микротрон; в — двухсторонний микротрон, или квадруполь; г — гексаполь; 1 — ускоряющий элемент; 2 — магнитный диполь.

ние длительности импульса к интервалу между импульсами) определяется возможностями используемых СВЧ-генераторов и обычно лежит в пределах  $10^{-3}$ — $10^{-4}$ . Благодаря простоте конструкции и эксплуатации, а также хорошим качествам ускоренного пучка (высокая монохроматичность, малый поперечный эмиттанс) классич. М. широко применяются в ядерной физике, медицине, дефектоскопии, радиац. физике, а также в качестве инжекторов релятивистских электронов для синхротронов.

С кон. 70-х гг., в осн. в связи с актуальностью проблемы создания интенсивных электронных пучков высоких энергий непрерывного действия, начали применяться М. т. н. волнитронного типа, в к-рых для формирования замкнутых орбит и обеспечения условия синхронизма используются неск. поворотных магн. диполей и ускоряющих СВЧ-структур, в т. ч. сверхпроводящих.

Простейший ускоритель этого типа — разрезной М., или М.-рейстрек (рис., б), состоит из ускоряющей СВЧ-структуры в двух  $180^\circ$ -х зеркально-симметричных магн. диполей. В свободных от магн. полей участках орбит размещаются ускоряющие, фокусирующие, корректирующие и диагностич. элементы ускорителя. Разрезные М. с импульсными нуклеидами получили распространение в качестве инжекторов электронов для накопит. колец. Предельные энергии, достижимые в таких разрезных М., лежат в интервале 800—1000 МэВ. В полторах высших порядков — квадруполье, или двухстороннем М. (рис., в), гексаполье (рис., г), октуполье и т. д. — используются по неск. элементов периодичности, каждый из к-рых включает ускоряющую СВЧ-структуру и два зеркально-симметричных участка магн. поля сегментного типа, обеспечивающих (совместно с фокусирующими элементами) ахроматический (т. е. не зависящий от энергии) перенос пучка между ускоряющими структурами.

Ускорители полнотронного типа дают значит. выигрыш в весе и стоимости магн. диполей, а также выгодно от-

личаются от обычных М. шириной области фазовой стабильности. На основе использования полнотронов проектируются каскадные ускорит. комплексы для получения непрерывных электронных пучков с энергиями до 4—5 ГэВ и ср. токами до 300 мА. Рост фазового объема пучка из-за квантовых флуктуаций синхротронного излучения электронов является осн. фактором, ограничивающим достижимые в полнотроне энергии.

Лит.: Капица С. П., Мелехин В. Н., Микротрон, М., 1969; Ранд Р. Е., Recirculating electron accelerators, Р.— [а. о.], 1984. К. А. Белоусице.

**МИКРОФОН** (от греч. *mikrós* — малый и *phónē* — звук) — приёмник звука, представляющий собой электроакустический преобразователь, предназначенный для преобразования звуковых колебаний в воздушной среде в электрич. сигналы. В комплект М., как правило, входят помимо собственно преобразователя и другие необходимые для его практич. применения элементы: согласующие трансформаторы, предварит. усилители и др.

М., как всякий приёмник звука, характеризуется чувствительностью, диапазоном воспроизводимых частот (т. е. частотной характеристикой чувствительности), направленностью, динамич. диапазоном. Верхней границей последнего является т. н. предельный уровень звукового давления, при к-ром коэф. гармонич. искажений сигнала на выходе М. достигает 0,5—1%; ниж. граница динамич. диапазона, т. н. эквивалентный уровень звукового давления, представляет собой уровень звукового давления, при к-ром на выходе М. обеспечивается напряжение, равное напряжению шума, обусловленного собств. молекулярными шумами преобразователя, тепловыми шумами резистивных элементов, шумами предварит. усилителя и т. п. Практически во всех преобразователях М. имеется подвижный элемент (диафрагма, мембрана), способный колебаться под воздействием звукового давления и осуществляющий т. о. акусто-механич. преобразование.

В зависимости от того, каким образом формируется результирующая сила  $F$ , воздействующая на подвижную систему, все М. подразделяется на приёмники давления, градиента давления и комбиниров. приёмники. В приёмниках давления звуковое поле действует на подвижную систему с одной стороны; результирующая сила  $F$  в этом случае не зависит от направления прихода звуковой волны и М., при условии, что его размеры малы по сравнению с длиной волны, не обладает направленностью.

У градиентных приёмников подвижная система подвергается с обеих сторон воздействию звукового поля и результирующая сила определяется разностью  $\Delta p$  звуковых давлений на двух акустич. входах системы, находящихся на расстояниях  $d$  друг от друга:  $F = d \text{grad} p \cos \theta$ , где  $\theta$  — угол падения звуковой волны относительно акустич. оси преобразователя. Направленность такого приёмника описывается ф-цией  $\cos \theta$ , причём макс. выходной сигнал имеет место при осевом падении звуковой волны, т. е. при  $\theta = 0$  и  $\theta = 180^\circ$ , а при  $\theta = 90^\circ$  выходной сигнал равен нулю.

Объединяя приёмник градиента давления с приёмником давления либо электрически, либо путём построения соответствующей механо-акустич. системы, получают комбиниров. приёмник, позволяющий реализовать в зависимости от соотношения чувствительности исходных приёмников разнообразные диаграммы направленности. Чаще всего используются комбиниров. приёмники с диаграммами направленности в виде кардиоиды, суперкардиоиды и гиперкардиоиды. Для создания остронаправленных М. применяют акустич. зеркала или конструкции типа акустич. антенны бегущей волны.

По энергетич. характеристикам все М. можно разделить на две группы: М., энергия выходного сигнала к-рых обеспечивается источником питания, и М., энер-

гия выходного сигнала к-рых обусловлена лишь преобразованием энергии звукового поля.

М., относящиеся к первой группе, являются необратимыми преобразователями; их достоинство — большая мощность выходного сигнала, позволяющая обойтись в ряде случаев без доплотит. усилителей. Типичным представителем М. первой группы служит угольный М., используемый в телефоне. Принцип его действия основан на зависимости электрич. сопротивления между частями угольного порошка от давления, а к-рым действует на порошок диафрагма М., колеблющаяся под воздействием звукового поля. В такт с колебаниями диафрагмы изменяется ток в цепи М., подключённого к источнику питания. Выходной переменный сигнал может быть выделен с помощью трансформатора, первичная обмотка к-рого включена в цепь М. Угольные М. выполняются лишь как приёмники давления. Диапазон воспроизводимых угольными М. частот невелик — от сотен Гц до ксв. кГц, однако он достаточен для обеспечения разборчивости речи. Чувствительность их составляет 200—400 мВ/Па при токе питания 10—100 мА, динамич. диапазон не превышает 30 дБ. Коэф. гармонич. искажений может достигать 10—20%.

М. второй группы могут иметь значительно более высокие эл.-акустич. параметры. По принципу механоэлектрич. преобразования они подразделяются на эл.-динамические, эл.-статические и пьезоэлектрические. Наиб. широкое применение в акустотехнике нашли эл.-динамич. М. — катушечные и ленточные. У катушечного эл.-динамич. М. (рис. 1) пост. магнит  $I$  создаёт в кольцевом зазоре 2 радиальное магн. поле, в к-ром находится звуковая катушка 3 с лёгкой диафрагмой 4 (подвижная система), закреплённой на магн. системе с помощью гофриров. вентрилки 5. При колебаниях диафрагмы под действием звуковых волн меняется магн. поток, пронизывающий катушку, и на её зажимах индуцируется эдс. Эл.-динамич. катушечные М. выпускаются в осн. как приёмники давления и комбиниров. приёмники. Их частотный диапазон охватывает область от 20 Гц до 20 кГц, чувствительность составляет 1—3 мВ/Па. Благодаря высоким эл.-акустич. параметрам, простоте конструкции и надёжности в эксплуатации катушечные эл.-динамич. М. применяются в бытовой технике, системах звукоусиления и профессиональной звукозаписи.

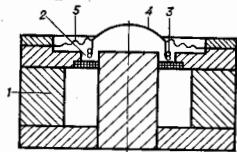


Рис. 1. Устройство электродинамического катушечного микрофона.

Более ограниченное применение находят ленточные М., у к-рых подвижной системой служит тонкая ленточка из гофриров. металлич. фольги, закреплённая между ползсами пост. магнита и являющаяся одновременно подвижным проводником. В связи с малой длиной ленточки чувствительность М. составляет всего 10—20 мВ/Па; для её повышения приходится предусматривать встроенный повышающий трансформатор, увеличивающий размеры и массу ленточного М. Ленточные М. чаще всего выполняются как градиентные приёмники. Они отличаются гладкими частотными характеристиками чувствительности во всём слышимом диапазоне частот.

Среди используемых М. наиб. высокими эл.-акустич. параметрами обладают конденсаторные М., построенные на базе эл.-статич. преобразователей (рис. 2). Подвижная система такого преобразователя представляет собой тонкую мембрану  $U$ , являющаяся одновременно и обкладкой плоского конденсатора. Второй обкладкой конденсатора служит массивный неподвижный электрод 2 с отверстиями, к-рые делают в нём для

обеспечения необходимых диссипативных свойств воздушного зазора между электродами. С помощью источника тока, напряжения  $U_0$  в рабочем зазоре конденсатора создаётся электрич. поле. При колебаниях мембраны под воздействием звуковых волн ёмкость конденсатора меняется и через сопротивление нагрузки  $R$  протекает разрядно-зарядный ток  $I$ , создающий на сопротивлении  $R$  напряжение сигнала  $U$ , повторяющее по форме акустич. сигнал. Если мембрана преобразователя выполнена из электретного материала или такой материал наносится на неподвижный электрод, то необходимость в источнике поляризующего напряжения исключается, поскольку электрет создаёт в зазоре преобразователя требуемую напряжённость поля.

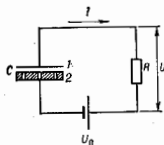


Рис. 2. Схема включения электростатического преобразователя.

Конденсаторные М. выполняются как приёмники давления, градиента давления и комбиниров. приёмники. Благодаря низкой массе мембраны, к-рая изготавливается из металлич. фольги или металлизиров. полимерных плёнок толщиной 3—10 мкм, частотный диапазон конденсаторных М. часто простирается от единиц Гц до 150 кГц и выше. Чувствительность их в области звуковых частот составляет ~10 мВ/Па; диапазон собственно преобразовател. конденсаторных М. достигает 130—140 дБ. Из-за высокого внутр. сопротивления эл.-статич. преобразователи нельзя непосредственно подключать к входной линии. Предварит. усилитель с большим длиной сопротивлением должен располагаться непосредственно в корпусе М.

Конденсаторные М. являются осн. видом измерит. звукоприёмников для воздушной среды; они находят широкое применение и в акустотехнике. В лаб. практике, а также в дешёвых системах оповещения используются пьезоэлектрич. М., в основе к-рых находится пьезоэлектрический преобразователь с пьезоэлементом либо биморфного типа, совершающим изгибные колебания под действием звукового давления, либо в виде пьезокерамич. сферы или цилиндра. Пьезоэлектрич. измерит. М. выполняются в виде приёмников давления, градиентных и комбинированных. Весьма перспективными как для измерит. целей, так и для акустотехники представляются пьезоэлектрич. М. на основе пьезополимерных преобразователей, отличающиеся малым весом и (потенциально) широким частотным диапазоном.

Лит.: Ф у р д е в В. В., Акустические основы weighing, М., 1980; Р и м с к и й В. К., К о р е в и ч А. В., Электроакустика, М., 1973; Л е г с ч Р. В., Electroacoustical properties of piezopolymer microphones, «J. Opt. Soc. Amer.», 1981, v. 69, № 6, p. 1809; К о л о с и н о в А. Е., Акустические измерения, Л., 1983.

**МИКРОЭЛЕКТРОНИКА** — область электроники, охватывающая проблемы создания электронных устройств в микроминиатюрном интегральном исполнении. Осн. практ. продукция М. — интегральные схемы (ИС), к-рые служат элементами ЭВМ и техн. средств искусств. интеллекта, автоматизация, систем управления и связи.

В ИС величайшие твердотельные приборы, детали структуры к-рых имеют микронные размеры (микробиоры), и линия связи между ними формируются в едином технол. процессе на общей пластине — подложке (интегральная технология). Важнейшие приборы, входящие в состав ИС: транзисторы (биполярные, полевые), их комплементарные пары ( $n-p-p$  —  $p-p-p$ ;  $n$ -каналные и  $p$ -каналные); энергозависимые транзисторы (напр., с плавающим затвором); диоды твердотельные (на  $p$ - $n$ -переходах, диоды Шоттки); приборы с зарядовой связью (передача заряда в цепях из тысяч МДП-элементов, см. МДП-структура), на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД), на доменных стенках и линиях. Разрабатываются новые

типы транзисторов: с баллистич. пролётом электронов (без рассеяния на дефектах и фононах) с двумерным электронным газом, с прогибаемой базой (внутри базы расположена металл. решётка, играющая роль сетки) и др.

Внутр. линии связи ИС (электрич., оптич., в т. ч. волоконные, магн., акустические) обеспечивают обмен сигналами и согласованное протекание множества процессов, локализованных в объёме кристалла. Т. о., наряду с интеграцией элементов в М. достигается интеграция нелинейных физ. явлений. Системы микроприборов и связей между ними образуют единое устройство — информат. автомат, к-рый выполняет функции хранения, обработки и обмена данными с внеш. миром (человеком, др. автоматами, техн. объектами, включая роботов и исполнит. механизмы), моделирование физ. и др. процессов, вывод сигналов, управляющих разл. устройствами.

Степень интеграции  $N$  — число транзисторов или их функциональных групп (т. н. логич. «вентилей», ячеек памяти и др.) в одной ИС — показатель её сложности. С возникновением М. (50—60-е гг. 20 в.)  $N$  непрерывно растёт:  $N \approx 2^{0,85}$  (для крупносерийных логич. ИС) и  $N \approx 2^2$  (для лучших образцов схем памяти), где  $t$  — «возраст» М. (с 1960). Тридцатидвухразрядные микропроцессоры, т. н. транспьютеры, и др. суперкристаллы имеют  $N \geq 10^6$  и реализуют центр. часть ЭВМ с производительностью  $\sim 10^7$  операций в 1 с, устройства самодиагностики и даже «саморемонта». Ультратонкие ИС памяти имеют ёмкость до  $2^{24}$  бит (16 мегабит).

Уровень миниатюризации. Мин. размер  $l_0$  «деталей» внутр. геометрии ИС (ширина проводников, длина канала полевого транзистора и т. п.) — осн. показатель уровня миниатюризации. Уменьшение  $l_0$ , связанное с возможностями *микротографии*, на к-рой основано формирование внутр. геометрии ИС, происходит со ср. скоростью, определяемой соотношением  $l_0 = (50 - 20) \cdot 2^{-0,85}$ . В пром. ИС  $l_0 = 1,5 - 2,5$  мкм, в лучших ИС  $l_0 = 0,8 - 1,0$  мкм (1987). С уменьшением  $l_0$  увеличивается быстротечность и снижается энергопотребление элементов, но усложняются физ. процессы, их теоретич. анализ, проектирование и оптимизация. В нач. период развития М. (при  $l_0 \geq 10$  мкм) нелинейные электронные процессы локализовались в активных областях отд. транзисторов (напр., в базе биполярных транзисторов). Оптимизация при этом была основана на одномерных моделях (приближение бесконечных плоских  $p - n$ -переходов), и проектирование ИС «наследовало» осн. принципы проектирования электронных схем на дискретных приборах. При  $10 \geq l_0 \geq 5$  мкм нелинейные явления внутри транзисторов и активные связи между ними (аппаратные транзисторы) осложнили применение этой модели, а при  $5 \geq l_0 \geq 1$  мкм «лавинное» нарастание этих явлений, влияние сильного электрич. поля и *горячие электроны* потребовали перехода к нелинейным двумерным, а затем трёхмерным моделям, аналитически не разрешимым и требующим расчётов на ЭВМ. Нелинейным становится и поведение внутр. связей. Абс. величина тока снижается  $\propto l_0$ , а сечений линий  $\propto l_0^2$ , плотность тока возрастает, и разогрев проводников в сочетании с сильным электрич. полем и высокой плотностью тока вызывает перенос ионов и атомов прямым дрейфом или электронным ветром. При  $l_0 = 0,1 - 0,2$  мкм достигается оптимум, ниже к-рого быстротечность перестаёт возрастать, а энергопотребление транзисторов перестаёт снижаться. Их др. характеристики также ухудшаются. Кроме того, начинают развиваться нежелательные коллективные электронные процессы. Т. о.,  $l_0 = 0,1$  мкм — нижний физ. предел М., основанный на классич. принципах синтеза схем. Теоретич. предел быстротечности  $\sim 10^{13}$  с (системные ограничения обусловлены процессами внутрисхемной передачи сигналов, задержки сигналов, согласованием линии связи и их некогерентностью и др.).

Технология микроэлектроники и системы автоматизированного проектирования (САПР). Технол. ограничения в М. определяют возможности планарной технологии — последнего синтеза структуры твёрдотельного устройства с помощью многократно повторяющихся (до 10—16 раз; с развитием М. это число возрастает) групп операций, причём каждая группа формируется на поверхности подложки двумерный рисунок и преобразует его в объёмную внутр. геометрию ИС, а погрешность совмещения каждого последующего рисунка  $\ll$  предыдущего  $\ll l_0$ . При проектировании конечная структура представляется в виде совокупности плоских картин (напр., в виде шаблонов). Это осуществляется с помощью САПР. Спец. компьютерные программы САПР основаны на функциональных и электрич. моделировании ИС и содержат «библиотеки стандартных элементов», из к-рых формируются ИС, оптимизируются геометрия её внутр. связей, проверка её устойчивости к помехам и т. д. Наб. совершенные САПР обеспечивают также оптимизацию внутр. структуры новых поколений ИС. САПР новых поколений ИС основаны на набв. мощных ЭВМ предыдущих поколений. Принцип последнего синтеза определяет границы М., в частности степень связности рисунка ИС при данном М. Системные ограничения планарных структур (быстротечность и мощность, степень связности и степень интеграции и т. д.) связаны предельными соотношениями. Теоретич. предел  $N \sim 10^{10}$  для ИС на целой полупроводниковой пластине с diam. 200—250 мм.

Физ. принципы действия ИС и технология их синтеза взаимно согласованы. Когда геом. размер твёрдого тела (хотя бы в одном измерении) становится достаточно малым, скорости протекания технол. процессов (диффузия, структурная перестройка, рост, травление и др.) перестают лимитировать их применение. Повтому в технологии М. используются разнообразные явления, включая диффузию и фазовые переходы в твёрдом теле, термические реакции, воздействие частиц высоких энергий, сфокусированных электронных и ионных пучков и др. Используются также процессы, селективные по отношению к разл. структурным и хим. состояниям кристалла. Требования к чистоте веществ в М. нередко превышают разрешающую способность методов их анализа.

Функциональная микроэлектроника. Ограничения, вызванные растущей плотностью и сложностью внутр. связей, стимулируют развитие т. н. функциональной М. — создание структур, функциональные свойства к-рых определяются коллективными электронными процессами и не могут быть реализованы путём коммутации отд. его областей; обработка информации осуществляется не схематех. путём, а динамич. распределением зарядов в полях — эл.-магн., тепловых, упругих. При этом используются оптич. явления (см. *Оптоэлектроника*), взаимодействие электронов с акустич. волнами (см. *Акустоэлектроника*). В связи с открытием высокотемпературной сверхпроводимости особое значение приобретают криоэлектронные приборы. Разрабатываются полностью оптичные (фотонные) вычислит. машины. Функциональная М. позволяет достичь предельно высокой производительности и мин. энергопотребления. Однако для каждого класса задач требуется создание спец. структур или сложной настройки. Кроме того, «несхематех.» решения характеризуются меньшей точностью и устойчивостью вычислений и моделирования.

При достаточно высоком уровне развития технологии становится возможным создание гибридных устройств, объединяющих цифровые схематехнические и функциональные процессоры, автоматически распределяющих между ними информат. потоки на каждом этапе решений задач. Существуют устройства, интегрирующие в едином твёрдом теле электронные и неэлектронные (в т. ч. синтезаторы речи) микромеханич. элементы (датчики, анализаторы, исполнительные микроме-

хланими, микродригателями и т. п.). Т. о., принцип М. распространяется на всю сферу устройств, функциональное назначение к-рых допускает миниатюризацию хотя бы в одном из трёх пространственных измерений.

Предполагается, что одна из новых ветвей развития М. пойдёт в направлении копирования процессов в живой клетке, ей присвоен термин «молекулярная электроника» или «биоэлектроника». Достигнувший уровень развития М. сделал возможным постановку исследований и разработку систем искусств. интеллекта.

Деградация микроэлектронных устройств. С термодинамич. точки зрения ИС — неравновесная система, закрытая для массообмена со средой, но открытая энергетически в процессе своего функционирования (см. *Открытая система*). Энергетич. обмен со средой ускоряет процесс релаксации системы к равновесному состоянию. Этот процесс наз. деградацией. Многообразие механизмов деградации породило новую область М., исследующую надёжность микроэлектронных устройств. Осн. особенность механизмов деградации в М. состоит в том, что они протекают при высоких плотностях тока (св.  $10^8$  А/см<sup>2</sup>), высоких напряжённости электрич. поля (св.  $10^6$  В/см) и поверхностных плотностях мощности ( $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>). В таких условиях становится неустойчивыми не только распределения тока и поля, но и атомная структура кристалла. Некоторые механизмы деградации могут быть использованы, напр. разрушающие или перестройка внутренних связей и перенос «пакетов» носителей зарядов в глубокие долушки.

Роль микроэлектроники в науке и технике. М. образует фундамент совр. средств автоматизации, связи, информ.-вычислит. техники. Парк последней в мире к сер. 80-х гг. достиг ок.  $10^8$  ЭВМ с производительностью от  $10^6$  до  $10^8$ , а в отл. ЭВМ до  $10^{10}$  операций в 1 с. Для физики особенно важны 3 класса проблем, решаемых с помощью ЭВМ: 1) автоматизация эксперимента, включая его планирование, управление, анализ и обработку результатов (в осн. с помощью профессиональных персональных ЭВМ); 2) численное решение на супер-ЭВМ сложных задач, но разрешимых аналитически (квантовомеханических, задачи Изинга с учётом гранич. кристалла и т. д.); 3) моделирование многочастичных систем и сплошных сред на многопроцессорных ЭВМ (до  $6,5 \cdot 10^4$  процессоров; проектируются — до  $10^6$ ); при этом организация внутр. информ. обмена топологически подобна организации физ. связей в моделируемых объектах.

М. стала источником новых идей и методов в физике твёрдого тела и материаловедении. В связи с задачами М. созданы, напр., устройства с управляемыми электронами и ионными пучками диаметром в пик. атомов, ионные источники (от протонов до тяжёлых ионов) широкого диапазона энергий (с диаметром пучка, близким к размеру отд. ионов), аппаратура для выращивания монокристаллов и многослойных структур, где толщина, состав и строение каждого слоя контролируются с точностью до параметра решётки (см. *Гетероструктура, Эпитаксия*), и т. д. Созданы новые пьезоэлектрические материалы, феррогранаты, материалы с высокой чувствительностью к действию света, рентг. излучения, электронных и ионных пучков и т. д. Одно из достижений микроэлектронного материаловедения — сверхрешётки на основе множества чередующихся сверхтонких слоёв полупроводников типа АIII — ВV.

Лит.: Новиков В. В. Теоретические основы микроэлектроники. М., 1972; Сквен К., Томсет М., Приборы с переносом заряда, пер. с англ., М., 1978; Чистяков Ю. Д., Райнов Ю. П., Физико-химические основы технологии микроэлектроники, М., 1978; Мейндл Дж., Элементы микроэлектронных схем, пер. с англ., «ЭФН», 1979, т. 7. В. Ф. Дорджин.

**МИКТОМАГНЕТИЗМ** (магнетизм кластерных стёкол) — совокупность магн. свойств нек-рых неупорядоченных твёрдых растворов (в определ. концентрац. интервалах), обусловленная наличием случайных кон-

центрированных (анакоренеренных) обменных взаимодействий между локализованными магн. моментами и неоднородностью распределения концентрации компонентов раствора (различиями в ближнем порядке атомов). Типичными представителями миктомагнетиков (ММ) являются концентров. растворы 3d-переходных элементов (Cr, Mn, Fe, Co) в матрицах блородных металлов (Ag, Au) и меди, содержащих включения хим. кластеров этих же магн. атомов.

ММ присущи след. магн. свойства: а) появление при нек-рой темп-ре  $T_f$  (т. н. темп-ре замораживания) излома на кривой зависимости динамич. магн. восприимчивости от темп-ры (рис. 1) или статич.

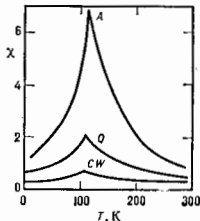


Рис. 1. Температурная зависимость динамической магнитной восприимчивости сплава CuMn (в произвольных единицах), измеренная в переменном поле с частотой 200 Гц и среднеквадратичным значением напряжённости 2,3 Э, для составленного при длительном изотермическом отжиге (А), закаленного (Q) и пластически деформированного (CW) образцов [5].

восприимчивости в предельно малых магн. полях, причём доложение  $T_f$  для динамич. восприимчивости зависит от частоты приложенного перем. магн. поля. Существование различающихся по размеру магн. кластеров приводит к «размытию» темп-ры  $T_f$ ; б) отсутствие у всей системы дальнего ферромагн. порядка ниже  $T_f$  (при охлаждении от высоких темп-р в отсутствие внеш. магн. поля) и др. типов дальнего магн. порядка — антиферромагн., геликоидального и т. д.; в) плавная температурная зависимость теплоёмкости вблизи  $T_f$ ; г) влияние термомагн. обработки, т. е. зависимости магн. свойств от взаимного порядка включения внеш. магн. поля и изменения темп-ры. Это проявляется, напр., в отсутствие спонтанной намагниченности в случае охлаждения образца от высоких темп-р (когда все магн. моменты ориентированы хаотично) до темп-ры ниже  $T_f$  в нулевом магн. поле (кривая O на рис. 2) и возникновении остаточной однонаправленной намагниченности в случае охлаждения образца в конечном магн. поле (кривая 10 на рис. 2), в зависимости величин остаточной намагниченности от времени и т. д.; д) сильная зависимость магн. свойств от режима металлургич. обработки образца (прокатка, отжиг и т. п.).

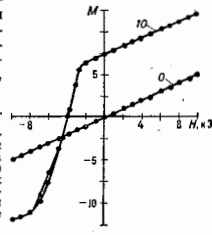


Рис. 2. Зависимость намагниченности M от магнитного поля для миктомагнитного сплава Cu-Mn (24,1 атомных % Mn) после охлаждения от высоких температур до 1,8 К в нулевом магнитном поле (O) и во внешнем магнитном поле 10 кОэ (10) [1].

Сочетание таких черт, как наличие остаточной намагниченности ниже  $T_f$  после выключения внеш. магн. поля (что типично для ферромагнетиков) и появление излома в магн. восприимчивости при определ. условиях (что типично для антиферромагнетиков), послужило основанием для введения термина миктомагнетизм, охватывающего смешанный магнетизм.

При низких темп-рах и отсутствии внеш. магн. поля структура ММ представляет собой матрицу сплю-

чайны расположенных по образцу и хаотически «замо-роженных» в раал. направленных локализованных атомных магн. моментов (спиновое стекло), в к-рой размещены случайно ориентированные магн. кластеры с ферро- или антиферромагнитным порядком (рис. 3). Хаотич. «замораживание» спинов в матрице возникает из-за того, что любой выделенный магн. момент взаимодей-

ходящимся в «замороженном» состоянии при низких температурах.

Лит.: 1) Kouvel J. S., The ferromagnetic — antiferromagnetic properties of copper-manganese and silver-manganese alloys, «Phys. and Chem. Solids», 1961, т. 21, № 1/2, p. 57; 2) Векс Р. А., Some recent results on magnetism in alloys, «Metall. Trans.», 1971, в. 2, № 8, p. 2015; 3) Векс Р. А., Comments on micromagnetism, «J. Less-Common. Met.», 1972, в. 28, № 1, p. 193; 4) Мудров В. А., Spin glasses and micromagnetism, «Prog. Mater. Sci.», 1978, т. 23, № 1, p. 1; 5) F. J. 1975, p. 131; 6) Tustison R. W., Effect of plastic deformation of micromagnetism in  $\text{Co}_2\text{Mn}_{11}$ , «Solid State Commun.», 1976, в. 19, № 11, p. 1075; 6) Векс Р. А., Properties of micromagnets (spin glasses), «Prog. Mater. Sci.», 1978, т. 23, № 1, p. 1; 7) Fischer K. H., Spin glasses (2), «Phys. Stat. Sol. (b)», 1985, в. 130, № 1, p. 13. М. В. Медведев.

**МИЛЛЕРОВСКИЕ ИНДЕКСЫ** — см. в ст. *Индекс кристаллографический*.

**МИЛЛИ...** (от лат. mille — тысяча) — приставка к наименованию единицы измерения для образования наименования *дольной единицы*, составляющей одну тысячную от исходной единицы. Обозначения: м, т. Напр., 1 мА (миллиампер) =  $10^{-3}$  А.

**МИЛЛИМЕТР РТУТНОГО СТОЛБА** (мм рт. ст., mm Hg) — внесистемная единица давления: 1 мм рт.ст. =  $133,332 \text{ Па} = 1,35952 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/см}^2$ .

**МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ** — радиоволны в диа-

пазоне частот от 30 до 300 ГГц (длины волн — 1–10 мм). Области практич. использования М. в.

определяются особенностями их распространения и взаимодействия с веществом. В атмосфере Земли М. в.

поглощаются молекулами газов, обладающими электр.

и (или) магн. дипольными моментами. В ниж. слоях атмосферы линии молекулярного поглощения соответ-

ствуют длинам волн 5 мм ( $\text{O}_2$ ), 2,53 мм ( $\text{O}_2$ ), 1,64 мм ( $\text{H}_2\text{O}$ ). «Окна прозрачности» атмосферы соответствуют

длинам волн 8 мм, 3,3 мм, 2 мм, в этих диапазонах можно использовать М. в. для наземной радиосвязи. Ослабление М. в. в гидрометеорах (дождь, облака, туман, град, снег) имеет нерезонансный характер, и величина

ослабления определяется параметрами гидрометеоров, их темп-рой, интенсивностью и т. д. В диапазоне М. в.

находятся интенсивные спектральные линии мн. газов, их исследование методами *жироволновой спектроскопии*

позволяет получить сведения о структуре молекул, кинетике и др. Освоение для радиосвязи диапазонов М. в.

связано с разработкой техники генерации и приема этих радиоволн, с созданием нового класса мощных

генераторов: мазеров на циклотронном резонансе, ги-

ротронов. М. в. используют в космич. линиях связи и в линиях связи «Земля — космос», при дистанц. зон-

дировании атмосферы и гидрометеоров с поверхности Земли, с научн.-исследоват. судов в открытом океане,

с самолетов и ИСЗ, в радиостроении, в миллиметровой сиеркестроении, для диагностики и нагрева плазмы.

Лит. см. при ст. *Распространение радиоволн*. А. П. Ивочкин.

**МИНИТРОН** (от лат. min — наименьший и ...трон) — вакуумный электронный прибор для генерирования СВЧ-колебаний, представляющий собой сверхминиатюрную разновидность отражательного *клатрона*.

М. имеет накаливаемый катод, миниатюрный объемный резонатор с обладающим большой емкостью узким зазором, ограниченным сетками, и отражат. электрод.

Большая емкость позволила сократить линейные размеры резонатора, к-рые у М. на порядок меньше длины волны генерируемых колебаний. Расположение катода

непосредственно под сеткой, ограничивающей зазор резонатора, обеспечило предельное сокращение длины

электронного пучка, что в свою очередь позволило достиг макс. плотности тока и повысить рабочий ток.

В результате снизилось рабочее напряжение, возросли кпд, диапазон электронной настройки и стабильность частоты по сравнению с др. типами отражат. кла-

тронов.

Первые М. созданы в СССР в кон. 1960-х гг. Масса М. обычно не превышает 40 г, питающее напряжение 100 В.

Типичное значение выходной мощности 50 мВт. М.

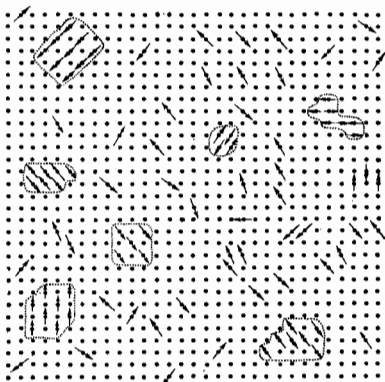


Рис. 3. Магнитная структура микроматнета при 10 атомных % магнитных атомов (примерная схема, кластеры выделены пунктирными линиями) [4].

ствует с остальными магн. моментами с помощью дальнедействующего азнакоперемного обмена и результирующее внутр. поле для данного спина будет случайным по величине и направлению. Однако отличие ММ от разбавленных *спиновых стекол* при достаточно низких темп-рах состоит в том, что элементарными носителями магнетизма в ММ выступают не только магн. моменты индивидуальных атомов, но и магн. моменты кластеров как целых образований, потому что локализов. магн. моменты атомов внутри кластеров жестко связаны между собой сильным близкодействующим обменным взаимодействием.

Существование ферромагн. кластеров в ММ влияет на их магн. свойства как выше  $T_f$ , так и ниже  $T_f$ . Выше  $T_f$  характеристики магн. восприимчивости оказываются близкими к случаю *суперпарамагнетизма*, причём из анализа данных следует, что магн. моменты отд. кластеров составляют от 20 до 20 000<sup>+</sup> (магнетонов Бора) в зависимости от состава сплава и его получения. Т. к. значение магн. момента кластера входит квадратично в выражение для магн. восприимчивости, то для н. низкотемпературный ожиг, усиливая близкий атомный порядок и увеличивая размеры кластеров, ведёт к значит. увеличению восприимчивости вблизи  $T_f$  (кривая А на рис. 1), тогда как пластик. деформация, уменьшая близкий атомный порядок, снижает восприимчивость (кривая СВ на рис. 1). Аналогично увеличение или уменьшение магн. моментов ферромагн. кластеров в результате металлурч. обработки приводит к соответствующему изменению величины остаточной намагниченности при охлаждении образца до внеш. магн. поле. Влияние кластеров с антиферромагн. упорядочением сказывается слабее, и оно изучено недостаточно.

Пока ещё не установлено, является ли микроматн. состояние термодинамически устойчивым в определ. температурном интервале. Принято считать, что М. присущ системам (твёрдым растворам, сплавам), на-



применяется в осн. в аппаратуру радиосвязи, в измерит. радиолокац. и др. устройствах в качестве задающих генераторов и гетеродинов.

Лит.: Годьят М. В., Бобровская Ю. Л., Микновский М., 1983. М. Б. Годят, МИНКОВСКОГО ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ (Минковского пространство) — четырёхмерное пространство, точки к-рого с координатами  $x^\mu$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ ) сопоставляются с событиями специальной относительности теории. Введено в физику Г. Минковского (H. Minkowski) в 1908 с целью геом. интерпретации релятивистской теории.

Каждое событие характеризуется тремя пространственными координатами  $x^i = (x^1, x^2, x^3) = (x, y, z)$  и моментом времени  $t$ , при этом удобно выбрать временную координату в виде  $x^0 = ct$ . В М. п.-в. вводится псевдоевклидова метрика, определяющая квадрат интервала — расстояния между бесконечно близкими событиями с координатами  $x^\mu$  и  $x^\mu + dx^\mu$ , след. образом:

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = (x^0)^2 - x^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2, \quad (1)$$

где  $\eta_{\mu\nu}$  — метрич. тензор, имеющий, как видно, отличные от нуля компоненты  $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ . Адекватность геом. структуры М. п.-в. признанию спец. теории относительности обусловлена тем, что Лоренца преобразования, с помощью к-рых осуществляется переход от одной инерц. системы отсчёта (и. с. о.) к другой, оставляют метрич. тензор  $\eta_{\mu\nu}$  форминвариантным. Поэтому, релятивистской гидродинамики, электродинамики и т.д. записаны в виде соотношений, связывающих векторы и тензоры (или спиноры), заданные в М. п.-в. то их вид будет одинаковым во всех и. с. о. Тем самым осн. принцип спец. теории относительности будет выполняться автоматически. Фактически метрика М. п.-в. инвариантна относительно более широкой группы преобразований координат — группы Пуанкаре, включающей сдвиги начала отсчёта пространств, координат и времени, повороты пространств осей и преобразования Лоренца:

$$x^\mu \rightarrow x'^\mu = L_\nu^\mu x^\nu + a^\mu, \quad (2)$$

где  $a^\mu = \text{const}$ , а матрица  $L_\nu^\mu$  удовлетворяет соотношениям

$$L_\lambda^\mu L_\nu^\mu = \eta_{\lambda\nu}, \quad L_\mu^\alpha L_\nu^\alpha = \eta^{\mu\nu}, \quad (3)$$

причём контравариантный метрич. тензор  $\eta^{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu}$  (как обычно, по повторяющемуся индексу производится суммирование).

Объединение пространств и времени в единое четырёхмерное многообразие отражает факт неабсолютности масштабов времени и пространственных расстояний, к-рые оказываются зависящими от выбора и. с. о. Напротив, одинаковой во всех и. с. о. является скорость света  $c$ , поднимаемая как универс. скорость распространения фундам. физ. взаимодействий. Промежутки времени и пространственные расстояния между двумя событиями зависят от того, в какой и. с. о. эти величины измеряются; абс. значение имеет лишь интервал между событиями, вычисляемый по ф-ле (1). Инвариантным относительно преобразований (2) (исключая отражения осей) является также элемент четырёхмерного объёма  $d\Omega = d^4x = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3 = c dt dV$ , в то время как величины  $dt$  и элемент пространственного объёма  $dV$  по отдельности не инвариантны.

Метрика М. п.-в., в отличие от евклидовой, не является положительно определённой, поэтому квадрат интервала (1) может быть положительным, нулевым или отрицательным. Поскольку величина  $d\Omega$  инвариантна относительно преобразований (2), это свойство не зависит от выбора и. с. о. и характеризует физические различные взаимоотношения между событиями. Если

$d\Omega^2 > 0$ , интервал в М. п.-в. временноточный, при этом найдётся и. с. о., в к-рой эти события происходят в одной пространственной точке. Такую и. с. о. можно связать с движущейся частицей, имеющей конечную массу, тогда  $ds$  можно истолковать как (умноженный на  $c$ ) промежуток собственного времени (т. е. измеренного по часам, движущимся вместе с частицей). Если  $d\Omega^2 < 0$ , то интервал наз. пространственноточным; в этом случае, напротив, не существует и. с. о., в к-рой события происходят в одной пространственной точке, но существует и. с. о., в к-рой эти события одновременны. Ясно, что такие события не могут быть причинно связанными друг с другом. Временная последовательность двух событий, разделённых пространственноточным интервалом, неабсолютна; существует и. с. о., в к-рой первое событие предшествует второму, и другая и. с. о., в к-рой второе предшествует первому.

Нарушение при преобразованиях Лоренца временной последовательности событий, разделённых пространственноточным интервалом, в совокупности с принципами квантовой теории приводит к важному следствию — необходимости существования античастиц. Рассмотрим два события:  $P_1$ , состоящее в испускании нейтроном  $n$ -мезона с образованием протона,  $n \rightarrow p + \pi^+$ , и  $P_2$ , состоящее в поглощении  $\pi^+$ -мезона др. протоном  $p'$  с образованием нейтрона  $n'$ ,  $p' + \pi^+ \rightarrow n'$ . Вследствие неопределённости соотношения имеется отличная от нуля вероятность второго события (с участием той же частицы  $\pi^+$ ), даже если интервал  $s_{12}$  между этими событиями пространственноточен, при условии, что  $|s_{12}| \leq \lambda$ , где  $\lambda$  — комптоновская длина волны  $\pi^+$ -мезона. Но тогда найдётся такая и. с. о., в к-рой поглощение  $\pi^+$  протоном наблюдалось бы до его испускания. Разрешение парадокса в квантовой теории состоит в том, что событие  $P_2$  можно понимать не как поглощение  $\pi^+$  протоном, а как испускание протонной частицы той же массы, но с противоположным знаком заряда, т. е. её античастицы —  $\pi^-$ -мезона:  $p' \rightarrow n' + \pi^-$ . Аналогично событие  $P_1$  будет состоять в поглощении  $\pi^+$  нейтроном с образованием протона:  $n + \pi^+ \rightarrow p$ .

Нулевое значение интервала,  $d\Omega^2 = 0$  (изотропный интервал), соответствует событиям, лежащим на мировых линиях безмассовых частиц, напр. фотонов, движущихся со скоростью  $c$ . Инвариантность равенства  $ds = 0$  по отношению к выбору и. с. о. и выражает собой факт постоянства скорости света во всех и. с. о.

Если выбирать начало четырёхмерной системы координат в М. п.-в. в точке, отвечающей век-рному заданному событию  $O$ , то мировые линии световых лучей, исходящих из  $O$ , будут образовывать гиперповерхность

$$c^2 t^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad (4)$$

наз. световым конусом. Все события, лежащие внутри светового конуса (т. е. в области  $c^2 t^2 > x^2 + y^2 + z^2$ ) при  $t > 0$ , происходят в абс. будущем по отношению к  $O$ , в частности мировые линии частиц, движущихся со скоростью  $v < c$ , проходящие через  $O$ , в последние моменты времени остаются внутри этой области. Аналогично события, лежащие внутри светового конуса при  $t < 0$ , абсолютно предшествуют  $O$ . Область М. п.-в., лежащая вне светового конуса (т. е. при  $c^2 t^2 < x^2 + y^2 + z^2$ ), соответствует событиям, к-рые не могут находиться в причинной связи с  $O$ , это абсолютно удалённая область. Трёхмерная гиперповерхность, проходящая через  $O$  и лежащая целиком вне светового конуса, будет пространственноточной, в простейшем случае — это гиперплоскость, ортогональная осн. времени, представляющая собой трёхмерное пространство в выбранной системе координат.

Векторы в М. п.-в. (4-векторы) при преобразованиях координат из группы Пуанкаре преобразуются по ф-ле

$$B^\alpha \rightarrow B'^\alpha = L_\nu^\alpha B^\nu, \quad (5)$$

а поднятие и опускание индексов осуществляется с помощью метрич. тензора  $\eta_{\mu\nu}$ . Примерами 4-векторов могут служить 4-скорость частицы ненулевой массы,  $u^\mu = dx^\mu/ds = (1-u^2)^{-1/2} (1, v_x, v_y, v_z)$ , 4-потенциал эл.-магн. поля  $A^\mu = (\text{сф. } A, \text{ где } \text{сф.} = \text{скалярный, } A = \text{векторный потенциал})$ . Аналогично вводятся тензоры высшего ранга, как многоиндексные величины, испытывающие преобразования (5) по каждому из индексов, напр. тензор эл.-магн. поля  $F_{\mu\nu} = \partial A_\nu / \partial x^\mu - \partial A_\mu / \partial x^\nu$ .

Преобразования координат более общего вида, чем (2), уже не будут оставлять метрич. тензор форминвариантным, это произойдёт, напр., при переходе к нелинейн. системе отсчёта. Разумеется, введение в М. п.-в. криволинейных координат не изменяет плоского характера геометрии М. п.-в. (в противоположность искривлённому пространству-времени при наличии гравитационной силы). Это выражается в равенстве нулю во всех точках пространства-времени *кривых тензора*  $R_{\mu\nu}$ , для метрики  $g_{\mu\nu}$ , получаемой из  $\eta_{\mu\nu}$  произвольным преобразованием координат. Напротив, при наличии гравитационной силы  $R_{\mu\nu}$  нельзя обратить в нуль сразу во всём пространстве-времени, однако в малой пространственно-временной области можно выбрать координаты так, что метрич. тензор  $g_{\mu\nu}$  будет отличаться от метрики Минковского лишь на величины второго порядка малости (переход в свободно падающую систему отсчёта). Т. о., искривлённое пространство-время общей теории относительности в достаточно малых областях по-прежнему описывается геометрией М. п.-в.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; Минковский Г., Пространство и время, в кн.: Принципы относительности, М., 1973; Миннер Ч., Торн К., Уилер Дж., Гравитация, пер. с англ., т. 1, М., 1977.

**МИРА** (франц. mire, от mirer — рассматривать на свет, прицеливаться, метить) — испытательная про-

зрастностью образующих их элементов. Часто такими элементами служат тёмные штрихи на светлом фоне (штриховая М.) или чередующиеся тёмные и светлые сектора (радиальная М.). Штриховая М. (рис. а) состоит из 25 элементов, каждый из к-рых включает четыре группы полос, наклонённых друг к другу под углом  $45^\circ$  (сек-рые элементы помечены цифрами). Внутри каждого элемента ширина и длина полос одинаковы, но ширина полос от одного элемента к другому убывает по закону геом. прогрессии со знаменателем  $2^{-1/2}$ . Ширина полосы  $a$  в мм определяется по ф-ле  $a = \varphi / \sqrt{412530}$ , где  $f'$  — фокусное расстояние в мм того объектива, в фокальной плоскости к-рого устанавливается М. Кроме того, ширина полосы  $a = 0,5\delta$  или  $a = 0,5N$ . Обычно набор штриховых М. имеет от 1,56 до 200 штрихов на 1 мм. Наблюдая изображение М., создаваемое оптич. прибором, определяют, на каком элементе изображения отд. штрихов перестают различаться (сливаются), что непосредственно даёт предельное разрешение прибора в числе штрихов  $N$  на 1 мм.

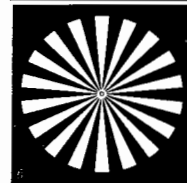
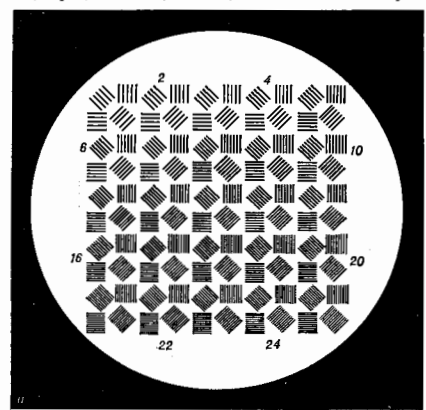
Радиальная М. (рис. б) представляет собой пластинку, на к-рую нанесён рисунок в виде чередующихся тёмных и светлых секторов. Общее число тёмных и светлых секторов обычно составляет 36, 48, 60, 72, 90, 120 или 180. За величину предела разрешения принимается расстояние между серединами одноимённых, ещё различаемых штрихов на концентрич. окружности. Если диаметр такой окружности  $D$ , а число одноимённых (светлых или тёмных) секторов  $m$ , то разрешимое расстояние  $\delta$  определяется ф-лой  $\delta = \lambda D/m$ ; в угл. мере предел разрешения определяется по у-нию  $\delta = \delta/f'$ ; в штрихах на 1 мм  $N = 1/\delta$ .

Обычно М. применяются для определения разрешающей способности разл. объективов (фотогр., проекционных и т. п.) и зрительных труб, а также для испытания разл. оптич. приборов.

**МИРОВАЯ ЛИНИЯ** — кривая в пространстве-времени (п.-в.), изображающая движение классич. (неквантовой) точечной частицы (т. е. непрерывную последовательность событий, отвечающих положению частицы в пространстве в каждый момент времени), а также распространение световых лучей. (В более широком смысле под М. л. иногда понимают произвольную кривую в п.-в.) В механике спец. теории относительности рассматриваются М. л. в *Минковского пространстве-времени* (в плоском п.-в.), в общей теории относительности — в *псевдоримановом пространстве* (в искривлённом п.-в.).

М. л. частицы с отличной от нуля массой времениподобна (см. *Времениподобный вектор*), такая кривая в случае п.-в. Минковского целиком лежит внутри *светового конуса* с вершиной в любой точке на ней. Это отражает тот факт, что частица ненулевой массы всегда движется со скоростью, меньшей скорости света  $c$ . У-ние М. л. принято записывать в параметрич. виде:  $x^\mu = x^\mu(\lambda)$ ,  $\mu = 0, 1, 2, 3$ , где  $\lambda$  — вещественный параметр,  $x^0 = ct$ ,  $x^1 = x$ ,  $x^2 = y$ ,  $x^3 = z$ . В качестве параметра  $\lambda$  на времениподобной М. л. удобно выбрать *интервал*  $s$ , т. е. «расстояние» в п.-в.,  $x^\mu = x^\mu(s)$ . Касат. вектор к М. л.  $u^\mu = dx^\mu/ds$  (4-скорость) будет в этом случае времениподобным вектором единичной длины:  $(u^0)^2 = (u^1)^2 + (u^2)^2 + (u^3)^2 - (u^0)^2 = 1$ , где опускание индекса осуществляется с помощью метрич. тензора п.-в. Минковского  $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ . Это свойство времениподобной М. л. имеет место и в псевдоримановом п.-в. общей теории относительности.

Частицы нулевой массы (напр., фотоны) в любой системе отсчёта движутся со скоростью света  $c$ . Поэтому М. л. таких частиц будут изображаться изотропными кривыми в п.-в., интервал между любыми двумя точками на к-рых (понимаемый как интеграл от  $ds$ ) равен нулю. В п.-в. Минковского М. л. безмассовых частиц, пересекающих начало четырёхмерной системы координат, образуют световой конус, разделяющий п.-в.



зрачная или непрозрачная пластинка, на к-рую нанесён стандартный рисунок; служит для количественного определения предела разрешения оптич. приборов в угл. секундах  $\varphi$ , в мм  $\delta$  или в числе штрихов  $N$  на мм. Рисунки для М. могут иметь разные конфигурации и характеризоваться разл. кон-

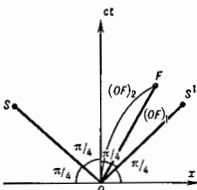
на области абс. будущего, абс. прошлого и абс. настоящего по отношению к событию, изображаемому точкой в вершине конуса.

М. л. свободных частиц (как массивных, так и безмассовых) в п.-в. Минковского изображаются прямыми, напр. для массивной частицы  $x^{\mu} = u^{\mu} s$ , где  $u^{\mu}$  — постоянная 4-скорость. Частицы, движущиеся под действием внеш. сил, будут изображаться искривлёнными М. л. (рис.). Прямая, соединяющая две точки, разделённые временноподобным интервалом в п.-в.

Мировые линии в пространстве-времени Минковского, описывающие однородное движение вдоль оси  $x$ :  $(OF)$  и  $(OF')$  — отрезки мировой линии массивной частицы, движущейся свободно (индекс 1) и под действием сил (индекс 2); прямая мировой линии  $(OF)$  отвечает максимальному значению «единицы

длин» в пространстве Минковского

между точками  $O$  и  $F$ ;  $OS$  и  $OS'$  — отрезки мировых линий безмассовых частиц (световых лучей); совокупность таких мировых линий для движения в трёх пространственных измерениях образует световой конус.



Минковского, имеет макс. длину по сравнению с искривлёнными М. л. Действительно, выбирая инерц. систему отсчёта, в к-рой частица, описываемая данной прямой, покоится, найдём, что длина отрезка прямой равна (умноженному на  $c$ ) промежутку времени частицы, измеряемому по неподвижным часам, к-рый всегда больше промежутка времени, измеренного по движущимся часам.

В общей теории относительности М. л. свободных частиц изображаются геодезическими линиями в искривлённом п.-в., описывающем данное гравитационное поле. В псевдоримановом пространстве (сигнатура — 2) временноподобные геодезические также являются кривыми макс. длины и, как и прямые в п.-в. Минковского, характеризуются тем, что касат. вектор к ним переносится параллельно вдоль М. л. Для безмассовых частиц М. л. являются изотропными геодезическими в рассматриваемом искривлённом п.-в. Изучение положения изотропных геодезических в искривлённом п.-в. важно для понимания его причинной структуры, оно лежит также в основе алгебраич. классификации полей тяготения по А. З. Петрову (см. *Тяготение*). М. л. частиц, испытывающих, помимо гравитационных, воздействие сил иной природы, изображаются кривыми в псевдоримановом пространстве общей теории относительности, отличными от геодезич. линий.

Лит. см. при ст. *Относительности теория, Тяготение*.

Д. В. Гальцов.

**МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ** — 1) Галактика. 2) Светлая полоса на ночном небе — проекция на небесную сферу удалённых (от Солнца) звёзд Галактики, близких к её плоскости. Повыш. яркость этой полосы обусловлена повыш. концентрацией звёзд в плоскости Галактики.

**МНОГОДОЛНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ** — оптич. изображение предмета, создаваемое расходящимся пучком лучей, прошедшим оптич. систему, если мысленно продолжить их в обратном направлении до пересечения. М. и., в отличие от действительного, нельзя получить на экране или фотоплёнке. Для того чтобы расходящийся пучок световых лучей превратился в сходящийся, нужно на их пути поместить собирающую оптич. систему. В частности, такой системой является глаз человека, изображение в этом случае получается на сетчатке. Простейший пример М. и. — изображение предмета в плоском зеркале. Подробнее см. *Изображение оптическое*.

**МНОГОДОЛНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ** — полупроводники с гл. экстремумом энергии. зоны (двояк зоны проводимости  $\epsilon_c$  или вершины валентной зоны  $\epsilon_v$ ), расположенным в точке импульсного простран-

ства с  $k \neq 0$  (см. *Зонная теория*). В этом случае существует не один, а неск. эквивалентных экстремумов, причём изоэнергетич. поверхности, построенные вблизи них, — эллипсоиды, переходящие друг в друга при преобразованиях симметрии Бриллюэна зоны. Окрестности эквивалентных экстремумов с эллипсоидальными изоэнергетич. поверхностями получили назв. долин и в. Энергетич. спектр такого полупроводника назв. многодолинным. Эллипсоидом соответствует анизотропный закон дисперсии носителей заряда  $\epsilon(p)$ , записанный в осях эллипсоида:

$$\epsilon^2(p) = \frac{1}{2} \left( \frac{p_x^2}{m_x^2} + \frac{p_y^2}{m_y^2} + \frac{p_z^2}{m_z^2} \right), \quad (1)$$

где квазиимпульс  $p = \hbar k$  отсчитывается от экстремума  $\alpha$ -й долины, а  $m_{\alpha i}$  — гл. значения тензора обратной эффективной массы в долине. Если экстремумы расположены на осях симметрии 3-го и 4-го порядков зоны Бриллюэна, то две из трёх масс совпадают. При этом изоэнергетич. поверхности — эллипсоиды вращения с осями вращения, совпадающими с осями симметрии кристалла (рис. 1). Общая изоэнергетич. поверхность  $\epsilon(p) = \text{const}$  — совокупность эллипсоидов.

В состоянии термодинамич. равновесия носители заряда распределяются поровну между долинами; поэтому в М. п. веск. (по числу долин) типов носителей. Они имеют одинаковые мнимумы (или максимумы) энергии и в этом смысле эквивалентны. Однако эфф. массы и, следовательно, подвижности при данном направлении движения носителей различны для разных долин [1].

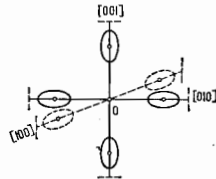


Рис. 1. Изоэнергетические поверхности электронов в зоне Бриллюэна для Si; пунктир — граница зоны Бриллюэна.

Анизотропия подвижности не нарушает симметрии равновесных электр., магн., эл.-механит. и др. свойств кристалла, т. к. они определяются суммарным вкладом всех эквивалентных долин. Напр., в кристаллах кубич. сингонии электропроводность и постоянная Холла в слабых полях изотропны.

Анизотропные свойства носителей в долинах проявляются при исследовании *циклотронного резонанса*, частота к-рого  $\omega_c = eH/m_e$ , где  $H$  — напряжённость магн. поля,  $e$  — заряд электрона,  $m_e$  — циклотронная эфф. масса, определяемая в случае эллипсоидальных изоэнергетич. поверхностей соотношением

$$\left( \frac{1}{m_e} \right)^2 = \frac{\cos^2 \theta}{m_x^2} + \frac{\sin^2 \theta}{m_y^2}, \quad (2)$$

где  $m_x$  — продольная эфф. масса (вдоль оси эллипсоида),  $m_y$  — поперечная масса,  $\theta$  — угол между осью и Н. Т. к. угол  $\theta$  для разл. долин разный, то  $\omega_c$  в разных долинах также различны.

Др. способ идентификации анизотропии носителей в долинах даёт анизотропия *магнетосопротивления*. В случае изотропного закона дисперсии носителей поперечное магнетосопротивление изотропно, а продольное отсутствует. В М. п. они оба отличны от 0 и анизотропны, причём характер анизотропии зависит от расположения долин в зоне Бриллюэна.

**Междолинное перераспределение носителей.** Эквивалентность долин может быть нарушена внеш. воздействием, напр. одностороннее сжатие кристалла вызывает разл. энергетич. смещение эквивалентных максимумов. В результате энергия носителей в одних долинах увеличивается, в других уменьшается. При этом равновесное заполнение долин становится неодинако-

вмы, и при относительно малой деформации можно допустить (при низких температурах) заполнения долин только одного типа за счёт полного опустошения остальных [2].

Перераспределение носителей между долинами можно получить в сильном электрич. поле, направленном под разл. углами к осям долин. При этом носители из равных долин «нагреваются» по-разному (см. *Горючие электроны*) и с разл. скоростью покидают «свои» долины, переходя в «чужие». Возникающее перераспределение долин приводит к большим величинам восприимчивостям  $M. п.$  в сравнительно слабых электрич. полях. С этим связаны также эффекты, как анизотропия электропроводности в «гребенных» электрич. полях (см. *Сакаи — Шибуда эффект*), нечётное по  $H$  магнитосопротивление (в т. ч. линейное) и чётный по  $H$  Холла эффект. С междолинным перераспределением носителей связаны также специфические для  $M. п.$  механизмы *устояеэлектрического эффекта*, поглощения звука, акустич. шумов, а также размерные эффекты [3]. Условия междолинного перераспределения, ответственного за большую величину этих эффектов: а) редкие переходы носителей из одной долины в другую по сравнению с внутримолинными переходами; б) слабый энергообмен между носителями из разных долин (по сравнению с их энергообменом с фононами), достигаемый при малой концентрации носителей [4].

$M. п.$  с эквивалентными долинами. К ним относятся три ближайших полупроводника с решёткой алмаза: алмаз,  $Ge$ ,  $Si$   $n$ -типа. В  $Ge$  наименьшие минимумы зоны проводимости находятся на краю зоны Бриллюэна в  $L$ -точках (в точках пересечения осей  $[111]$  с границей зоны Бриллюэна, рис. 2); и окрестностях этих точек образуется 4 долины ( $L$ -долины), причём в пределах зоны Бриллюэна каждая изоэнергетич. поверхность состоит из 8 полуэллипсоидов вращения. В долинах вдоль осей  $[111]$   $m_x$  в 19 раз превышает  $m_y$ . В алмазе и  $Si$  наименьшие экстремумы зоны проводимости располагаются на осях типа  $[100]$  ( $\Delta$ -осях) сравнительно близко к границе зоны Бриллюэна, но не на ней, наименьшими являются 6 долин, попарно расположенных на осях  $[100]$ ,  $[010]$  и  $[001]$ . Носители в соседней паре долин ничем не отличаются друг от друга, такая пара долин может рассматриваться как одна с удвоенной плотностью состояний, а рассеяние носителей между долинами такой — как внутримолинное рассеяние.

К  $M. п.$  относятся также кристаллы с решёткой сфалерита: электрические  $BN$ ,  $GaP$ ,  $AlSb$ . Наименьшие мини-

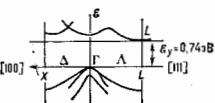


Рис. 2. Зональная структура кубического  $Ge$  для различных направлений симметрии.

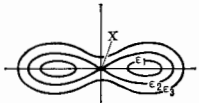


Рис. 3. Изоэнергетические поверхности  $\epsilon_c < \epsilon_c < \epsilon_c$  в окрестности точки  $X$  зоны Бриллюэна.

умы зоны расположены на  $\Delta$ -осях  $[100]$ , однако на границе (или почти на границе) зоны Бриллюэна ( $X$ -долины). При расположении минимумов почти на краю зоны ( $GaP$ ) 2 эллипсоидальные изоэнергетич. поверхности при незначит. возрастании энергии носителей сливаются в одну неэллипсоидальную (рис. 3). Многодолинную структуру имеют также  $PbS$ ,  $PbSe$ ,  $PbTe$ , где электрические и дырочные долины расположены друг под другом в  $L$ -точках, и все *полуметаллы*.

**Неэквивалентные долины.** Термин  $M. п.$  применяют также к электронным полупроводникам с двум зонам проводимости  $\epsilon_c$  при  $k = 0$  (в центре зоны Бриллюэна  $\Gamma$ ) в случае, когда в сравнительно малом энергетич. удалении от  $\epsilon_c$  есть более высокие минимумы ( $\epsilon_p$ ) ( $M. п.$  с неэквивалентными долинами). К таким полупро-

водникам относятся  $GaSb$ ,  $InP$  и др. При термодинамич. равновесии все электроны располагаются вблизи зоны проводимости (в неагривной  $\Gamma$ -долине). При разогрете носители электрич. полем происходят междолинное перерасеяние с неравномерным заполнением более высоких долин, где электроны «тяжелее» и, следовательно, плотность состояний больше, чем в  $\Gamma$ -долине. Следствием такого перерасеяния является (в частности) *Ганна эффект*, в основе к-рого лежит  $N$ -образный вид статической вольт-амперной характеристики (ВАХ)  $M. п.$  с неэквивалентными долинами. Падающая ветвь ВАХ обусловлена «потяжелением» электронов и уменьшением их подвижности из-за ухода в верхние долины.

Аналог эффекта Ганна наблюдается также и в  $M. п.$  с эквивалентными долинами, где ВАХ при токе в направлении, совпадающем с направлением большой эфф. массы одной из долин ( $[100]$  в  $n$ - $Si$  и  $[111]$  в  $n$ - $Ge$ ), также имеет падающий участок из-за ухода электронов в эту долину из др. долин, т. к. в них электроны сильнее разогреты (эффект Рывкина — Кастальского).

Лит.: 1) Цидильковский И. М. Зональная структура полупроводников, М., 1978; 2) Вир Г. Л., Линкус Г. Е., Симмондс П. в деформационные эффекты в полупроводниках, М., 1973; 3) Рабинович И. Г., Грибников С. С., Крайченко В. Я. Анизотропные размерные эффекты в полупроводниках и полуметаллах, УФН, 1978, т. 119, с. 3; 4) Гантмахер В. Ф., Левинсон Н. В., Рассеяние носителей в металлах и полупроводниках, М., 1984; см. также лит. при ст. *Полупроводники*. З. С. Грибовичево.

**МНОГОЗАРЯДНЫЕ ИОНЫ** (высокоионизованные атомы) — положительно заряженные ионы с большой кратностью ионизации.  $M. и.$  участвуют в процессах, протекающих в высокотемпературной лабораторной и астрофиз. плазме.

Специфич. особенности  $M. и.$ , отличные от свойств нейтральных атомов с таким же числом электронов, объясняются их сильными кулоновскими полем. К таким особенностям относятся конечная величина сечений возбуждения  $M. и.$  электронами при пороговых значениях энергии (ср. с *возбуждением атома и молекулы*), наличие резонансных ников на кривой зависимости эфф. сечений от энергии, восстановление правильности порядка заполнения электронных оболочек (у нейтральных многоэлектронных атомов он нарушается; см. *Атом*), наличие линий-сателлитов в спектрах испускания (см. ниже) и т. д.

Спектроскопич. символ  $N$  ( $z = Z - N + 1$ , где  $Z$  — заряд ядра иона,  $N$  — число электронов в нём) определяет масштаб величин его радиан. и столкновит. характеристик. Так, расстояние между уровнями энергии и *ионизационная потенциала*  $\sim z^2$ , длины волн спектральных линий  $\sim z^{-2}$ , потенциал электростатич. взаимодействия электронов с ядром  $\sim z$ , потенциал спин-орбитального взаимодействия  $\sim z^4$ , радиус иона  $r_0 \sim z^{-1}$ , *Албовский свеч*  $\sim z^2$ , вероятность электрич. диньного перехода  $\sim z^4$ .

Эфф. сечения столкновит. процессов также зависят от  $z$ . Эти процессы можно характеризовать масштабным фактором  $z^2$ , причём для процессов возбуждения и ионизации электронами  $\alpha = -4$ , для фотоионизации  $\alpha = -2$ , перезарядки при столкновениях с нейтральными атомами  $\alpha = 1$ , ионизации нейтральных атомов  $\alpha = 2$  и т. д. Т. о., эфф. сечения элементарных процессов с участием  $M. и.$  сильно зависят от партнёра по столкновению и параметра  $z$ .

С ростом  $z$  существенно возрастает влияние релятивистских и радиат. эффектов на характеристики  $M. и.$ , а тип связи угловых и спиновых моментов электронов отличается от  $LS$ -связи (см. *Связь векторная*): происходит непрерывный переход от  $LS$ -связи к  $jj$ -связи. Если спин-орбитальное и эл.-статич. взаимодействия одного порядка величинами, то имеет место промежуточный тип связи.

В результате появления релятивистских эффектов меняются *отбора правила*, разрешаются переходы, зап-

реждённые для нейтральных атомов, а при определении условий интенсивность запрещённых линий в спектрах М. и. становится значительной. Так, в плотной плазме интеркомбинац. линия  $2^3P_1 - 1^1S_0$  (см. *Интеркомбинационные квантовые переходы*) в спектрах гелиеподобных ионов с  $z > 10$  имеет сравнимую с резонансной линией  $2^1P_1 = 1^1S_0$  интенсивность. В нейтральных атомах HeI магн. дипольный переход  $2^3S_1 - 1^1S_0$  запрещён правилами отбора, в то же время в спектрах испускания плазмы низкой плотности соответствующая линия, принадлежащая гелиеподобным М. и., отчётливо регистрируется и используется для диагностики плазмы. Спектры М. и. мезоэлектронного ряда сходны со спектрами нейтральных атомов, имеющих то же число электронов, они лишь смещаются в КВ-область (длина волны  $\lambda \sim z^{-2}$ ). Так, линии волн резонансных линий атомов Н и He составили 1246 и 593 Å, а соответствующие линии в спектрах водородоподобных (HII) и гелиеподобных (HeI) ионов железа — 1,78 и 1,85 Å. В спектрах М. и. появляются, кроме того, дополнит. линии, отсутствующие в спектрах нейтральных атомов; их наз. с а т е л л и т а м и. Одна из причин их появления — влияние процесса *двиелектронной рекомбинации* М. и. при их взаимодействии с электронами плазмы. Такой процесс происходит в два этапа: сначала М. и. захватывают электрон, образуя автоионизац. состояние, энергия к-рого лежит выше границы ионизации образующегося иона; при этом в ионе одномоментно возбуждается ещё один или более электронов. Автоионизац. состояние затем может распадаться по двум каналам: автоионизационному — испусканием электрона или радиационному — испусканием кванта и переходом в стабильное (лежачее ниже границы ионизации) состояние. Для М. и. характерен радиац. канал распада с испусканием фотона  $h\nu$ . В результате таких переходов в спектре М. и. появляется линия-спутник на частоте  $\omega$ , соответствующей переходу в ионе, резонансной линии  $1s2p \ ^1P_1 - 1s \ ^1S_0$  гелиеподобных ионов являются линии, соответствующие переходам между конфигурациями  $1s2p^2 - 1s^22p$  в [Li] ионах. Ионы в дважды (или многократно) возбуждённых состояниях могут образовываться также при др. элементарных процессах.

Наиб. полно исследованы спектры [He] ионов и их спутники, т. е. спектры [Li] ионов. Эти ионы достаточно просты для исчерпывающего теоретич. анализа и информативны для определения параметров лаб. и астрофиз. плазм. Обозначения, принятые для спектральных линий [He] и [Li] ионов, приведены в табл. 1. Присутствие одного или неск. дополнит. электронов незначительно изменяет длины волн спутников по сравнению с осн. линией. Напр., для резонансной линии ( $w$ ) гелиеподобного иона FeXXV  $\lambda = 1,8504 \text{ Å}$ , а для её  $d$ - и  $g$ -спутников, т. е. ионов Fe XXIV,  $\lambda = 1,8628$  и  $1,8610 \text{ Å}$  соответственно.

С ростом  $z$  возрастает интенсивность спутников, она пропорциональна коэф. ветвления  $A/(A+W)$ , где  $A$  и  $W$  — вероятности радиац. и автоионизац. распада автоионизац. состояний. Вероятность  $W$  слабо зависит от  $z$ , в то время как  $A$  резко возрастает с ростом  $z$  (для электр. дипольных переходов  $A \sim z^3$ ), поэтому при больших  $z$  распад автоионизац. состояний происходит гл. обр. по радиац. каналу, т. е. с образованием линий-спутников. Спутники, как правило, имеют малую ширину (по отношению к расстоянию между ними) и при достаточном спектральном разрешении хорошо регистрируются. Т. о., в спектрах излучения М. и. сосредоточено большое число спектральных линий сравнимой интенсивности: линий, принадлежащих иону данной кратности (в т. ч. запрещённых, компонент тонкой структуры), а также спутников, испускаемых ионами меньших кратностей. Каждый ограниченный спектральный интервал содержит богатую информацию о строении иона, а также о параметрах плазмы, в к-рой он существует.

Табл. 1.

Электронная конфигурация	Мультиплет	$J - J'^*$	Обозначение
$1s2p^2 - 1s^22p$	$^3P - ^1P_0$	$3/2 - 1/2$	a
		$3/2 - 3/2$	b
		$1/2 - 1/2$	c
	$^1P - ^1P_0$	$3/2 - 1/2$	d
		$3/2 - 3/2$	e
		$1/2 - 1/2$	f
$^3D - ^3P_0$	$3/2 - 1/2$	g	
	$3/2 - 3/2$	h	
	$1/2 - 1/2$	i	
$^1S - ^1P_0$	$1/2 - 1/2$	j	
	$3/2 - 1/2$	k	
	$3/2 - 3/2$	l	
$1s2s^2 - 1s^22p$	$^1S - ^1P_0$	$1/2 - 1/2$	m
		$3/2 - 1/2$	n
$1s2p2s - 1s^22s$	$(^1P)^3P_0 - ^1S$	$3/2 - 1/2$	o
		$1/2 - 1/2$	p
	$(^3P)^3P_0 - ^1S$	$3/2 - 1/2$	q
		$1/2 - 1/2$	r
	$^1P_0 - ^3S$	$1/2 - 1/2$	s
		$3/2 - 1/2$	t
$1s2p - 1^1S$	$^1P_0 - ^1S$	1 - 0	u
		2 - 0	x
$1s2s - 1^1S$	$^1S - ^1S$	1 - 0	y
		1 - 0	z

\*  $J$  и  $J'$  — квантовые числа полного момента начального и конечного состояний.

Спектры М. и. наблюдаются в спектрах короны Солнца и звёзд; к лаб. источникам М. и. относятся: лазерная плазма, вакуумная искра, *плазменный фокус*, плазма *токамака*, *стелларатора*, пинч-источники, магн. ловушки, ускорители и т. д. Широкое распространение получили компактные ECR-источники М. и., основан-

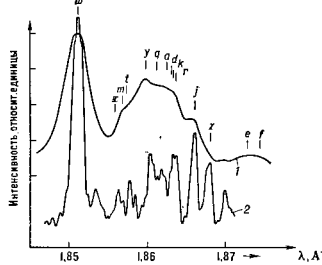


Рис. 1. Спектр вакуумной искры (J) и солнечной вспышки (g) для ионов Fe XXIV—XXV.

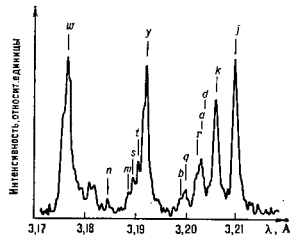


Рис. 2. Спектр лазерной плазмы (линии Ca XVIII—XIX).

ные на эффекте электронно-дипольного резонанса. Ионами с макс. кратностью ионизации являются [Н] и [Не] ионы урана ( $U^{91+}$  и  $U^{90+}$ ), полученные на ускорителе ионов в Радиационной лаборатории им. Э. Лоуренса

тарные процессы с участием многозарядных ионов, М., 1986; В. И. Штевалько, Штевалько В. П. Структура и характеристики ионов в горячей плазме, М., 1986; Рентгеновская спектроскопия многозарядных ионов, М., 1988. В. П. Штевалько.

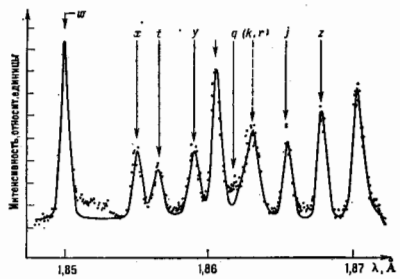


Рис. 3. Спектр плазмы токмака (линии Fe XXIV—XXV).

(1985, Беркли, США); для ионов  $U^{90+}$  измерен лэмбовский сдвиг уровня  $n=2$ ,  $k$ -ый равен  $69,1 \pm 8,0$  эВ, что хорошо согласуется с расчётными данными (75 эВ).

Первые эксперим. исследования спектров М. и их спутников были выполнены в 1920—40-х гг., интенсивные исследования начаты в 60—70-х гг. вентосферным изучением короны Солнца методами рентгеновской спектроскопии. Точность измерения  $\lambda$  в спектрах лаб. и астрофиз. источников сравнима с точностью теоретич. расчётов,  $\Delta\lambda/\lambda$  составляет  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  для диапазона  $\lambda = 1$ — $10\text{Å}$ . На рис. 1—3 приведены рентг. спектры для разл. источников М. и. Экспериментально, как правило, измеряются разности между длинами волн линий данной и резонансной,  $k$ -рая обычно согласуется с расчётной. Появились первые эксперим. измерения (1986) абс. длин волн переходов в [Н] и [Не] ионах. Эти результаты являются наиб. точными и подтверждают надёжность теоретич. расчётов. В табл. 2 приведены значения длин волн  $\lambda$  для резонансных переходов  $2^1P_1 - 1^1S_0$  в [Не] ионах, полученные в вакуумной искре и теоретически рассчитанные.

Табл. 2.

Ион	$\lambda(\text{Å})$	
	эксперимент	расчёт
$Ca^{19+}$	3,1771(15)	3,1771(3)
$Yb^{26+}$	2,38175(25)	2,3819(3)
$Cu^{29+}$	2,1818(2)	2,1820(1)
$Fe^{26+}$	1,8503(1)	1,8503(8)
$U^{90+}$	1,7111(15)	1,7119(8)
$Ni^{28+}$	1,58837(1)	1,5883(8)
$Ni^{27+}$	1,47758(7)	1,4775(7)
$Zn^{28+}$	1,37798(1)	1,3778(2)
$Ga^{29+}$	1,28782(1)	1,2877(1)
$U^{91+}$	0,84534(35)	0,8451(7)
$U^{90+}$	0,80181(15)	0,8081(2)
$Mo^{42+}$	0,6867(2)	0,6865(8)

диагностики высокотемпературной плазмы, изучать происходящие в ней элементарные процессы.

Мн. элементарные процессы с участием М. и (возбуждение, ионизация, перезарядка, диэлектронная рекомбинация и т. д.) представляют интерес для лазерной физики, физики плазмы, пучково-пленочной спектроскопии, физики атомных столкновений, рентг. астрономии и астрофизики и т. д.

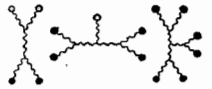
Лит.: М. в абс. д-р Штамм С. Л. Коротковолновые излучения Солнца в виде. Успехи Советского Союза в исследовании космического пространства, М., 1978; Novel sources of highly stripped ions, «Proc. of Int. Conf. Phys. of Highly Ionised Atoms», Oct. 2—5 July 1984 (North-Holland), Amst., 1985, p. 516; П р е с с - в е с т ь Л. Д., Штевалько В. И., Ячев В. К., Змеев В. К.,

**МНОГОЗНАЧНАЯ ФУНКЦИЯ** — ф-ция, сопоставляющая независимому переменному не одно, а нек-рое значение. М. ф. естеств. образом возникает в теории аналитических функций, когда аналитическое продолжение ф-ции, заданной в окрестности нек-рой точки  $z$  вдоль замкнутого контура, приводит к ф-ции с др. значениями в окрестности той же точки. Такая ситуация возникает, в частности, когда рассматриваемая аналитич. ф-ция имеет внутри данного контура точку ветвления. Считая точку  $z$  др. обхода контура и ту же точку  $z$  после его обхода разными точками, рассматривают соответствующую неоднолистную область, в  $k$ -ой данная аналитич. ф-ция уже однозначна. Макс. неоднолистная область, в  $k$ -ой заданная ф-ция аналитична, наз. *римановой поверхностью* этой ф-ции.

Напр., ф-ция  $f(z) = \sqrt[n]{z}$ ,  $n=2, 3, \dots$ , имеет в точке  $z=0$  точку ветвления порядка  $n$ . При однократном обходе этой точки против часовой стрелки она уменьшается на  $\exp(2\pi i/n)$ . При  $n$ -кратном обходе её первонач. значение восстанавливается. Ф-ция  $f(z) = \ln z$  имеет в точке  $z=0$  точку ветвления бесконечного порядка. При однократном обходе этой точки против часовой стрелки  $f(z)$  изменяется на  $2\pi i$ .

Лит. см. при ст. Аналитическая функция. В. И. Завьялов.

**МНОГОВАРКОВЫЕ СОСТОЯНИЯ** — гипотетич. локализов. состояния в адронных системах, содержащих более трёх валентных кварков или более одной кварк-антикварковой пары. Как и обычные резонансы, они считаются «бесцветными», т. е. инвариантными относительно цветовой калибровочной преобразования. К М. с. относят: а) 4-кварковые состояния из 2 кварк-антикварковых пар, цветные связи  $k$ -рых схематически изображены на рис. 1 [чёрные кружки — кварковые состояния, светлые — антикварковые, волнистые линии — цветные связи, тройной вершине отвечает абсолютно антисимметричный тензор  $\Sigma_{ab\gamma}(\alpha, \beta, \gamma = 1, 2, 3$  — цветные индексы)]; б) 5-кварковые состояния из 4 кварков и антикварка



(рис. 2); в) многобарионные состояния типа изображённого на рис. 3 6-кваркового состояния, имеющего, согласно модели кваркового мешка (см. *Кварковые модели*), наим. массу.

М. с. могут иметь экзотич. квантовые числа, невозможные для 3-кварковых и кварк-антикварковых систем (барионов и мезонов), напр. изотопич. спин 2 или  $5/2$  в случаях а) и б), барионное число 2 в случае в). Поскольку высокоэнергетич. процессы с обменом экзотич. квантовых числами подавлены (см. *Редкие процессы*), масса таких М. с. должна быть достаточно большой. Убедит. эксперим. доказательств существования М. с. нет, имеются лишь косвенные свидетельства в их пользу. В первую очередь это *кумулятивные процессы* на ядрах, свидетельствующие о наличии многобарионных состояний. Имеются также указания на наличие в  $\pi$ -р-системе резонанса с изотопич. спином  $5/2$  и ряд других.

А. В. Ефремов.

**МНОГООБРАЗИЕ** — множество, точки  $k$ -рого задаются набором чисел (координат), причём при переходе от точки к точке координаты меняются непрерывно. Локально, т. е. в нек-рой окрестности каждой точки, М. устроено так же, как *евклидово пространство*  $R^n$  (элементы  $k$ -рого представляют собой наборы  $n$  вещественных чисел  $\{z^1, \dots, z^n\}$ ). М. являются конфигурац. и фазовые пространства динамических систем. Напр., положение твёрдого тела, закреплённого в одной точке, задаётся углами Эйлера  $\theta, \phi, \psi$ , так что его конфигу-

рац. пространство является 3-мерным  $M$ . [оно совпадает с группой 3-мерных вращений  $SO(3)$ ].  $M$ , являющийся также непрерывными группами и однородное пространство (см. *Группа*). Понятие  $M$  возникло в результате обобщения понятия поверхности; применяется в разл. областях теоретич. физики (аналитич. механика, теория тяготения, квантовая теория поля, теории калибровочных полей и др.). Часто в физике используют  $M$  с дополненными математическими структурами, например  $M$ , со связностью.

Наличие координат позволяет распространить на произвольное дифференцируемое  $M$  мн. методы матем. анализа, развитые первоначально для 3-мерного евклидова пространства  $R^3$  (см. *Векторный анализ*), а затем перенесённые в  $n$ -мерное евклидово пространство  $R^n$ . Гл. трудностью является то, что в  $M$ , как правило, нет выделенной системы координат (подобной декартовой системе координат в  $R^n$ ). Поэтому приходится рассматривать все возможные системы координат и строить теорию так, чтобы можно было переходить от одной системы координат к другой. Напр., в теории тяготения, где предполагается, что пространство-время является римановым  $M$  (см. *Риманово пространство*), требование, чтобы ур-ния не зависели от выбора системы координат, является одним из важных принципов (принцип общей ковариантности).

В дифференц. геометрии (т. н. матем. анализ на  $M$ ) всё большее распространение получают бескоординатные методы, в к-рых координаты явно не фигурируют (по крайней мере при нек-рых общих доказательствах и рассуждениях). Это удобно и важно с точки зрения физ. приложений, т. к. позволяет отделиться от несущести деталей (связанных с выбором конкретной системы координат) и сделать явным инвариантный характер используемых матем. объектов (отсутствие зависимости от системы координат). В 3-мерном анализе аналогом такого подхода является использование вектора  $a$  вместо его компонент  $a_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  (к-рые меняются при изменении системы отсчёта). Разумеется, в бескоординатном подходе повсюду всегда присутствуют координаты, т. к. они необходимы для определения всех осн. понятий.

В физ. приложениях  $M$  часто возникает как подмногообразие в евклидовом пространстве, заданное с помощью ур-ний. Напр., двумерная сфера  $S^2$  определяется как поверхность в  $R^3$ , выражаемая ур-нием  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ ;  $n$ -мерная сфера  $S^n$  определяется как

множество точек в  $R^{n+1}$ , выделяемых ур-нием  $\sum_{i=1}^{n+1} (x^i)^2 = 1$  (здесь  $x^i$  — декартовы координаты в  $R^{n+1}$ ); независимые ур-ния  $F_k(x^1, \dots, x^n) = 0$ ,  $k = 1, \dots, m$ , выделают в  $R^n$   $M$  размерности  $n - m$ .

Системы координат. Каждая система координат на многообразии  $M$  определяется в нек-рой области  $U \subset M$  и сопоставляет каждой точке этой области,  $x \in U$ , набор вещественных чисел  $\{x^1, \dots, x^n\}$  (координат этой точки). При этом область  $U$  (координатная окрестность) взаимно однозначно отображается на некоторую область евклидова пространства  $R^n$ . Именно возможность такого отображения позволяет перенести в  $M$  аналитич. методы, развитые первоначально на  $R^n$ . Напр., на сфере  $S^2$  пара чисел  $\{x, y\}$  может служить координатами точек верх. полушара ( $z > 0$ ) или ниж. полушара ( $z < 0$ ). Однако нельзя рассматривать как систему координат на всей сфере, т. к. иначе двум разным точкам сопоставятся бы один и тот же набор координат. Синхр. координаты  $\{\theta, \varphi\}$  определяют ф-лами  $x = \sin \theta \cos \varphi$ ,  $y = \sin \theta \sin \varphi$ ,  $z = \cos \theta$  на всей сфере  $S^2$ , за исключением её полюсов (точек  $x = y = 0$ ,  $z = \pm 1$ ). Числа  $\xi = 2x/(1-z)$ ,  $\eta = 2y/(1-z)$  (получающиеся при т. н. стереографич. проекции сферы  $S^2$  на плоскость) могут служить координатами на всей сфере, за исключением её северного полюса (точки  $x = y = 0$ ,  $z = 1$ ).

Двумерная сфера  $S^2$  — пример  $M$ , на к-ром по-прежнему не существует выделенной системы координат, но к-рое вообще нельзя покрыть единой системой координат. Причина в том, что сфера радикально отличается от плоскости  $R^2$  своими топологич. свойствами, т. е. не может быть непрерывным образом деформирована в плоскость (см. *Топология*). Чтобы иметь координаты в окрестности каждой точки сферы, необходимо рассмотреть более одной системы координат. В общем случае  $M$  вводит целое семейство систем координат так, чтобы области их определения (координатные окрестности) в совокупности покрывали всё  $M$ . Каждую систему координат из этого семейства наз. картой, а всё семейство — атласом. Для согласования карт друг с другом используют ф-ции перехода между ними. Если области определения  $U, U'$  двух карт имеют общие точки, то каждой такой точке  $x \in U \cap U'$  сопоставляют два разл. набора координат  $\{x^1, \dots, x^n\}$  и  $\{x'^1, \dots, x'^n\}$ . Тем самым определяются ф-ции перехода  $x'^i = f^i(x^1, \dots, x^n)$ , к-рые должны быть непрерывными. То же самое делают для каждой пары карт из атласа.  $M$  наз. дифференцируемым  $M$  (класса  $C^\infty$ ), если все возникающие при этом ф-ции перехода бесконечно дифференцируемы. Иногда требуют лишь дифференцируемости до порядка  $p$  ( $M$  класса  $C^p$ ).

Напр., стандартная структура  $M$  на сфере  $S^2$  (согласованная со структурой обьемлющего евклидова пространства  $R^3$ ) задается атласом из 3 карт: сферич. координатами  $\{\theta, \varphi\}$  вне полюсов, координатами  $\{x, y\}$  в верх. полушаре и координатами  $\{x, y\}$  в ниж. полушаре. При этом сфера оказывается (бесконечно) дифференцируемым  $M$ . Структуру  $M$  на  $S^2$  можно определить эквивалентным атласом из 2 карт:  $\{x, y\}$  в верх. полушаре и стереографич. координаты  $\{\xi, \eta\}$  на всей сфере, за исключением северного полюса. Эквивалентность 2 атласов означает, что ф-ции перехода между любыми 2 картами обоих атласов дифференцируемы.

Дифференцируемые отображения. Наличие координат позволяет определить понятие дифференцируемой ф-ции на  $M$ , опираясь на известное понятие дифференцируемой ф-ции числовых переменных. Если ф-ция  $z \rightarrow \varphi(z)$  задана в каждой точке  $x \in M$ , то в координатной окрестности  $U \subset M$  её можно записать как ф-цию координат точки  $\varphi(x^1, \dots, x^n)$ . Если использовать каждую карту, входящую в атлас, приводит при этом к дифференцируемой ф-ции числовых переменных, и исходная ф-ция на  $M$  наз. дифференцируемой.

В приложениях часто рассматривают не только числовые ф-ции на  $M$ , но и отображения из одного  $M$  на другое,  $\alpha: M \rightarrow N$ . При этом многообразия  $M$  и  $N$  могут иметь любые размерности. Напр., параметризованную кривую на  $M$  можно считать отображением  $t \rightarrow x(t)$  вещественной прямой  $R$  (область значения параметра) в данное  $M$ . Др. примером могут служить взаимно однозначные отображения  $M$  на себя,  $\alpha: M \rightarrow M$ , к-рые обычно наз. преобразованиями  $M$ . Важную роль в физике играют преобразования симметрии.

Выбирая в многообразиях  $M$  и  $N$  системы координат  $\{x^1, \dots, x^m\}$  и  $\{y^1, \dots, y^n\}$ , можно по отображению  $\alpha: M \rightarrow N$  построить набор ф-ции числовых переменных:  $y^i = \alpha^i(x^1, \dots, x^m)$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Если при любом выборе карт в  $M$  и  $N$  эти ф-ции оказываются дифференцируемыми, то отображение  $\alpha$  наз. дифференцируемым. Дифференцируемое отображение наз. диффеоморфизмом, если оно взаимно однозначно и обратное к нему также дифференцируемо. Важную роль играют диффеоморфизмы  $M$  на себя, называемые также дифференцируемыми преобразованиями  $M$ . В физ. приложениях возникают группы диффеоморфизмов (преобразований), сохраняющих ту или иную дополнит. матем. структуру на  $M$ .

Напр., преобразования, сохраняющие метрику риманова пространства, образуют группу его изометрий,

или движений. В частности, преобразования, сохраняющие метрику  $n$ -мерного евклидова пространства, наз. ортогональными и образуют группу  $O(n)$ . Дифференцируемое преобразование *симплектического многообразия*, сохраняющее *симплектическую структуру*, наз. симплектик. диффеоморфизмом. Если симплектик. структуру интерпретировать как гамилтонову структуру на фазовом пространстве, то симплектик. диффеоморфизм наз. каноническим преобразованием (см. *Гамильтоновы формализм*).

Дифференцируемое преобразование  $\alpha: M \rightarrow M$  порождает некоторое преобразование  $\alpha^*$  пространства всех дифференцируемых  $\phi$ -циев на  $M$ .  $\phi$ -циев  $\phi$  сопоставляется при этом новый  $\phi$ -циев  $\alpha^*\phi$ , значения  $k$ -рой находят по ф-ле  $(\alpha^*\phi)(x) = \phi(\alpha^{-1}(x))$ . В дальнейшем под отображениями всегда будут иметься в виду дифференцируемые отображения.

**Векторные поля.** Важную роль в матем. анализе играет операция дифференцирования. В евклидовом пространстве из-за существования выделенных декартовых координат достаточно удобным является дифференцирование по координатам. В произвольном  $M$ , где все координаты равноправны, вводят понятие инвариантного (не зависящего от выбора координат) дифференцирования. В результате возникают понятия касат. вектора и векторного поля, а также дифференцирования вдоль касат. вектора и вдоль векторного поля.

Если имеется 2-мерная поверхность в 3-мерном евклидовом пространстве, то в каждой точке можно провести к этой поверхности касат. вектор, а все векторы, касающиеся поверхности в данной точке, образуют касат. плоскость. В теории  $M$  понятие касат. вектора и касат. пространства необходимо определить внутр. образом, не обращаясь к вложению  $M$  в евклидово пространство. Для этого вектор, касающийся  $M$  в нек-рой точке, интерпретируют как задавший нек-рое направление в этой точке и скорость движения по этому направлению. Направление и скорость движения вдоль него можно охарактеризовать при помощи параметризов. кривой, целиком лежащей в  $M$  и проходящей через данную точку. Это и служит основой для определения касат. вектора в произвольном  $M$ .

Пусть на многообразии  $M$  задана гладкая кривая  $t \rightarrow x(t)$ , проходящая через точку  $x \in M$ , т. е. удовлетворяющая условию  $x(0) = x$ . Вводя в окрестности точки  $x$  систему координат, получим описание кривой при помощи числовых  $\phi$ -циев  $x^i(t)$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Такая кривая определяет в точке  $x$  касательный вектор  $X$ , а числа  $X^i = dx^i(t)/dt|_{t=0}$  являются компонентами этого вектора по отношению к данной системе координат. Разумеется, другая кривая,  $t \rightarrow \tilde{x}(t)$ , проходящая через точку  $x$  и касающаяся первой кривой в этой точке (т. е. такая, что  $d\tilde{x}^i(t)/dt|_{t=0} = dx^i(t)/dt|_{t=0}$ ), определяет тот же самый касат. вектор. Поэтому вектор  $X$  соответствует целому пучку касающихся друг друга кривых. Все касат. векторы в данной точке  $x \in M$  образуют *векторное пространство* размерности  $n$ , называемое *касательным пространством*  $T_x$ . Касат. вектор является геом. объектом, т. е. он не зависит от системы координат; его компоненты при переходе от одной координатной системы к другой преобразуются по закону

$$X^i = \sum_j X^j \partial x^i / \partial x^j.$$

Объединение всех касат. пространств  $T_x$  образует новое  $M$ , наз. касат. расслоением над первонач.  $M$ .

Касат. вектор  $X \in T_x$  позволяет сопоставить каждой (дифференцируемой)  $\phi$ -циев  $\phi$  на  $M$  число  $X\phi = d\phi(x(t))/dt|_{t=0}$ , называемое производной  $\phi$ -циев вдоль данного вектора. Через компоненты вектора эта производная выражается в виде  $X\phi = \sum_i X^i \partial \phi / \partial x^i|_x$ .

При переходе к др. системе координат это выражение

остается неизменным, в чём проявляется инвариантный характер понятия касат. вектора и дифференцирования вдоль него. При дифференцировании произведений двух  $\phi$ -циев выполняется правило Лейбница:

$$X(\phi\psi) = (X\phi)\psi + \phi(X\psi).$$

Если в каждой точке  $x \in M$  задан касат. вектор  $X(x) \in T_x$ , то говорят, что на  $M$  задано векторное поле  $X$ . Если компоненты этого поля  $X^i(x)$  являются гладкими  $\phi$ -циев в любой карте из атласа, то векторное поле наз. дифференцируемым. Векторное поле  $X$  сопоставляет каждой  $\phi$ -циев  $\phi$  на  $M$  новую  $\phi$ -циев  $X\phi$  со значениями  $(X\phi)(x) = X(x)\phi$ . Она наз. результатом дифференцирования  $\phi$ -циев  $\phi$  вдоль векторного поля  $X$ . Т. о., чтобы продифференцировать  $\phi$ -циев  $\phi$  вдоль векторного поля, нужно продифференцировать её вдоль каждого вектора  $X(x)$ ,  $x \in M$ , и полученные числа считать значениями новой  $\phi$ -циев. При этом дифференцируемая  $\phi$ -циев переводится гладким векторным полем в дифференцируемую, причём выполняется правило Лейбница

$$X(\phi\psi) = \phi(X\psi) + \psi(X\phi).$$

Векторное поле  $X$  как инвариантный (не зависящий от выбора координат) объект часто отождествляют с оператором дифференцирования вдоль этого поля. В нек-рой координатной окрестности  $U$  этот оператор представляют в виде  $X|_U = \sum_i X^i \partial / \partial x^i$ . При переходе к др. системе координат получается др. выражение  $X|_{U'} = \sum_i X^i \partial / \partial x^i$ . Однако на пересечении координатных окрестностей,  $U \cap U'$ , эти выражения совпадают благодаря закону преобразования компонент векторного поля  $\sum_i X^i \partial / \partial x^i = \sum_j \tilde{X}^j \partial / \partial \tilde{x}^j$ . Такое совпадение является отражением геом. (инвариантного) характера векторного поля и соответствующего дифференциального оператора.

Дифференциальные операторы, соответствующие двум векторным полям  $X$  и  $Y$ , можно прокоммутировать, полученный оператор  $[X, Y] = XY - YX$  снова является дифференциальным, т. е. соответствует нек-рому векторному полю. Это векторное поле наз. коммутатором исходных векторных полей, его компоненты в нек-рой системе координат равны

$$[X, Y]^i = \sum_j (X^j \partial Y^i / \partial x^j - Y^j \partial X^i / \partial x^j).$$

Все (дифференцируемые) векторные поля образуют Ли алгебру относительно операции коммутирования.

**Группы преобразований.** Векторное поле  $X$  задано в каждой точке  $M$ . Направление и скорость движения в этом направлении. Если двигаться в заданных направлениях с заданными скоростями, то все точки  $M$  будут постепенно перемещаться, т. е. определится семейство преобразований  $M$ , зависящее от параметра,  $\alpha$ , причём  $\alpha \alpha^i = \alpha_i t$ , т. е. это семейство представляет собой однопараметрич. группу преобразований. В общем случае векторное поле определяет однопараметрич. группу преобразований лишь локально, т. е. в нек-рой окрестности каждой точки и для нек-рого интервала изменения параметра. Если группа определена глобально (на всём многообразии и для всех значений параметра), векторное поле наз. полным. На компактных  $M$  все гладкие векторные поля являются полными.

Обратно, если задана однопараметрич. группа преобразований  $t \rightarrow \alpha_t$ , то определяется векторное поле  $X = d\alpha_t/dt|_{t=0}$ . Дифференцирование вдоль такого поля описывается ф-лой

$$X(x)\phi = d\phi(\alpha_t(x))/dt|_{t=0}.$$

Связь между векторным полем и группой преобразований можно выразить в виде  $\alpha'_t = \exp(-tX)$ , где  $X =$



дифференц. оператор, а эквипонента определена разложением в ряд. В этой ф-ле оператор  $X$  выступает как генератор однопараметрич. группы преобразований.

Группа преобразований  $\alpha_t$  определяется для каждой точки  $x \in M$  кривую  $t \rightarrow x(t) = \alpha_t(x)$ , к-рая проходит через эту точку и имеет в этой точке касат. вектор  $X(x)$ . Т. о., на  $M$  определяется семейство кривых, касательных к векторному полю  $X$ . В координатной окрестности  $U$  эти кривые являются решениями системы дифференц. ур-ий

$$dx^i(t)/dt = X^i(x^1(t), \dots, x^n(t)).$$

Если  $\varphi$  — ф-ция на  $M$ , то на кривой  $t \rightarrow x(t)$  она превращается в ф-цию одного параметра,  $t \rightarrow \varphi(x(t))$ . Зависимость от этого параметра описывается тогда дифференц. ур-нем  $d\varphi/dt = X\varphi$ . Т. о., векторные поля позволяют инвариантным образом записывать дифференц. ур-ния на  $M$ .

Напр., фазовое пространство гамильтоновой системы с  $n$  степенями свободы представляет собой  $2n$ -мерное  $M$ , в окрестности каждой точки к-рого можно ввести канонич. координаты  $\{p_1, \dots, p_n, q^1, \dots, q^n\}$  (обобщенные импульсы и обобщенные координаты). Разл. канонич. координаты связаны канонич. преобразованиями. Динамика системы задается ф-цией Гамильтона  $H$ , определенной на фазовом пространстве. Векторное поле в этом пространстве, к-рое в канонич. координатах имеет вид

$$I = \sum_i \left( \frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial}{\partial q^i} - \frac{\partial H}{\partial q^i} \frac{\partial}{\partial p_i} \right),$$

наз. гамильтоновым полем.

В каждой точке это поле касательно к интегральной кривой ур-ий Гамильтона, а соответствующая этому полю однопараметрич. группа преобразований фазового пространства,  $\alpha_t$ , описывает эволюцию системы с течением времени. Если  $\varphi$  — ф-ция на фазовом пространстве, то её изменение с течением времени описывается ур-нием  $d\varphi/dt = I\varphi$ . Это ур-ние можно записать при помощи Пуассона скобок:

$$d\varphi/dt + \{H, \varphi\} = 0.$$

Преобразование  $M$   $\alpha$  естеств. образом определяет не только преобразование  $\alpha^*$  ф-ций на этом  $M$ , но и преобразование  $\alpha'$  векторных полей. Если векторное поле  $X$  соответствует однопараметрич. группе преобразований  $t \rightarrow \alpha_t$ , то новое поле  $\alpha'X$  определяется группой  $t \rightarrow \alpha_t \alpha' \alpha_t^{-1}$ . Можно определить это поле и непосредственно,  $\alpha'X = \alpha^* X \cdot (\alpha^*)^{-1}$ , где векторные поля справа и слева следует понимать как дифференц. операторы в пространстве ф-ций.

Если векторное поле  $X$  порождено группой преобразований  $\alpha_t$ , то коммутатор двух векторных полей можно выразить через эту группу:

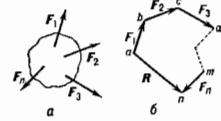
$$[X, Y] = - \frac{d}{dt} \alpha'_t Y \Big|_{t=0}.$$

Напр., пусть  $G$  — группа Ли (см. *Группы Ли* и  $R_g, L_g$  — операторы (преобразования) правого и левого сдвига на ней,  $R_g(g') = g'g$ ,  $L_g(g') = gg'$ ). Тогда каждой однопараметрич. подгруппе  $t \rightarrow g(t)$  в группе  $G$  соответствует однопараметрич. группа преобразований группы  $G$ , понимаемой как  $M$ ,  $t \rightarrow R_{g(t)}$ . Эта группа в свою очередь порождает векторное поле  $X = dR_{g(t)}/dt|_{t=0}$ , инвариантное относительно левого сдвига (левонаривариантное),  $L'X = X$ . Все такие поля образуют алгебру Ли, изоморфную алгебре Ли группы  $G$ . Другую реализацию векторные поля, порождаемые группами преобразований  $t \rightarrow L_{g(t)}$ .

Лит.: Н. Г. Мидзу К., Группы Ли и дифференциальная геометрия, пер. с англ., М., 1960; Бишоп Р., Кристенден Р., Геометрия многообразий, пер. с англ., М., 1967; Арнольд Л. В., И. Малъметские методы классической механики, 2 изд., М., 1979; Дубровин В. А., Новиков С. П., Фоменко А. Т., Современная геометрия, 2 изд., М., 1986; Шутц Б., Геометрические методы математической физики,

пер. с англ., М., 1984; Рихтмайер Р., Придирини сопеременной математической физики, пер. с англ., т. 2, М., 1984. М. В. Менский.

**МНОГУГОЛЬНИК СИЛ** — ломаная линия, к-рая строится для определения гл. вектора (геом. суммы) данной системы сил. При построении  $M$  с. для системы сил  $F_1, F_2, \dots, F_n$  (рис. а) от произвольной точки  $a$  откладывают в выбранном масштабе вектор  $ab$ , изображающий силу  $F_1$ , от его конца откладывают вектор  $bc$ , изображающий силу  $F_2$ , и т. д. и от конца  $n$ -предпоследней силы откладывают вектор  $mn$ , изображающий силу  $F_n$  (рис. б). Фигура  $abc\dots mn$  наз.  $M$  с. Вектор  $an$ , соединяющий в  $M$  с. начало первой силы с концом последней, изображает геом. сумму  $R$  данной системы сил. Если точка  $n$  совпадает с  $a$ ,  $M$  с. наз. замкнутым; в этом случае  $R = 0$ . Правило  $M$  с. может быть получено последоват. применением правила параллелограмма сил. Построением  $M$  с. можно пользоваться при графич. решении задач статики для системы сил, расположенных в одной плоскости.



**МНОГОФАЗНОЕ ТЕЧЕНИЕ** — течение смеси, в к-рой могут присутствовать газообразная, жидкая и твердая фазы неск. веществ.  $M$  т., как правило, является *неравновесным течением*. К  $M$  т. относят течение смеси газа с каплями и твердыми частицами одного или неск. веществ, смеси жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками, смеси жидкости с каплями жидкости и газовыми пузырьками др. состава, смеси газов, жидкости и твердых частиц; течения композиц. материалов, водонасыщенных грунтов и т. п.

$M$  т. — течение гетерогенных смесей в отличие от течения однородных по фазовому состоянию гомогенных смесей. Частный случай  $M$  т. — *двухфазное течение*, в к-ром присутствуют только две фазы вещества. Жидкие и твердые частицы, газовые пузыри в  $M$  т. могут различаться не только фаз. свойствами входящих в них молекул, но и скоростями, темп-рой и плотностью. При  $M$  т. происходят фазовые превращения: конденсация и испарение, плавление, кристаллизация, сублимация.

$M$  т. по сравнению с гомогенным течением существенно сложнее. Так, при взаимодействии твердых или жидких частиц с газом возможно их ускорение или замедление, нагрев или охлаждение, что приводит к аэродинамич. дроблению, испарению, слиянию (коагуляции) жидких частиц, что в свою очередь оказывает воздействие на параметры газовой фазы. Эти же эффекты могут приводить к сепарации частиц разл. размеров, к повышенной концентрации их в разных областях течения и, наоборот, к полному отсутствию в других. Твердые частицы при взаимодействии могут упрямо и неуруго сталкиваться, дробиться и т. д. В потоках газа с твердыми и жидкими частицами, а также в парожидкостных потоках, движущихся в каналах, трубах и соплах реактивных двигателей и аэродинамич. труб, при  $M$  т. возможно образование пленок на стенках, срыв и осаждение капель и частиц на них, теплообмен между паром, каплями и пылью. Твердые или жидкие частицы могут попадать на стенки, оседать на них либо отражаться и вновь попадать в поток. При взаимодействии частиц со стенками возможны динамич. и тепловые разрушения последних (эрозия).

Т. о., при  $M$  т. происходит чрезвычайно сложное взаимодействие фаз, сопровождающееся реальными фаз.-хим. процессами, изменяющими состав, газодинамич. и термодинамич. параметры каждой из фаз, их массовую долю и размеры включений (жидких либо твердых частиц, пузырьков). При взаимодействии фаз происходит обмен массой, импульсом и энергией. При  $M$  т. процессы диффузии, вязкого взаимодействия, тур-

булентности, распространения звука, излучения, ударных волны существенно иные, чем при течении однородных смесей.

При матем. описании многофазной сплошной среды используются законы сохранения массы, импульса и энергии для каждой из фаз и смеси в целом, записанные в интегральной или дифференц. формах, применяя при этом понятие о многоскоростном континууме с взаимопроницающим движением составляющих. Многоскоростной континуум представляет собой совокупность  $N$  континуумов, каждый из к-рых относится к своей составляющей смеси и заполняет одна и та же объём, аная смесь. Для каждого из этих составляющих континуумов в каждом потоке определяются плотность, скорость, а также и др. параметры. Тогда в каждой точке объёма, занятого смесью, будет определено  $N$  плотностей, темп-р и скоростей. Так, при течении газа с жидкими или твёрдыми частицами группы частиц разл. размеров с разными физ. свойствами образуют многоскоростной континуум в соответствии с числом таких групп.

Для полного описания движения многофазной среды необходимы ещё термич. и калорич. ур-ния состояния, позволяющие выразить тензор напряжения и внутр. энергию через остальные параметры смеси и некие-рые физ.-хим. константы. При решении конкретных задач следует использовать также соотношения, определяющие параметры массового, силового и энергетич. взаимодействия между фазами. К числу таких соотношений относят, напр., соотношения, позволяющие определять скорость возникновения жидкой фазы при конденсации, сопротивление частиц при их обтекании, законы слияния и дробления жидких частиц, скорость кристаллизации и т. д.

М. т. имеют место в метеорологич. процессах, авиации, технол. процессах, энергетике и т. д.

Лит.: Крайов А. Н. и др., Механика многофазных сред, в кн.: Итоги науки и техники. Сер. Гидродинамика, т. 6, М., 1972. У. Г. Пурдом.

**МНОГОФОТОННАЯ ИОНИЗАЦИЯ а т о м а** (молекулы) — образование иона в результате поглощения в одном элементарном акте одновременно неск. фотонов. М. и. является частным случаем более общего процесса *многофотонного поглощения*, включающего ещё и многофотонное возбуждение атома, и многофотонную диссоциацию молекул. М. и. происходит при энергии фотона  $h\omega < V_{и}$  ( $V_{и}$  — *ионизационный потенциал*), когда процесс одnofотонной ионизации (фотоионизации) невозможен, но суммарная энергия поглощённых  $m$  фотонов  $m h\omega \geq V_{и}$ . Целая часть величины  $\langle \frac{V_{и}}{h\omega} + 1 \rangle$  вна. степенью многофотонности (степенью нелинейности) процесса М. и. Многофотонная ионизация является одним из предельных случаев единого процесса перехода электрона из связанного состояния в атоме в свободное под действием переменного эл-трич. поля при  $h\omega < V_{и}$  (др. предельный случай — *туннельный эффект*). Переход электрона в свободное состояние при поглощении  $m$  фотонов происходит не по реальным связанным возбуждённым состояниям — уровням энергии  $\epsilon_i$  в спектре атома (такие переходы невозможны ни при какой энергии фотонов ввиду ангармоничности атомного спектра), а с нарушением закона сохранения энергии в соответствии с *неопределённости соотношением*  $\Delta E \Delta t \geq h$ .

Вероятность  $w$  одноврем. поглощения атомом  $m$  фотонов при М. и. связана с интенсивностью излучения  $I$  степенным соотношением  $w = \alpha_m I^m = \alpha_m E^{2m}$ , т. е. резко зависит от напряжённости эл-трич. поля  $E$  световой волны. Т. о., М. и. — нелинейная (по интенсивности излучения) ионизация. Сечение М. и.  $\alpha_m$  определяется свойствами конкретного ионизируемого атома (молекулы), частотой и поляризацией ионизирующего излучения. Для расчётов величин  $\alpha_m$  типичных нестационарных *возмущений теории*. Типичный вид зависимости  $\alpha_m(\omega)$  приведён на рис. 1. Резонансные мак-

симумы обусловлены реализацией промежуточных резонансов между частотой излучения (энергией фотона  $h\omega$ ) и энергией переходов из основного в возбуждённые состояния в спектре атома (молекулы). В слабом поле возмущающего излучения резонансные частоты определяются спектром атома. В сильном поле энергии пере-

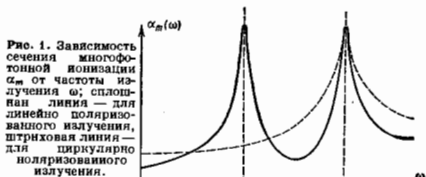


Рис. 1. Зависимость сечения многофотонной ионизации  $\alpha_m$  от частоты излучения  $\omega$ ; сплошная линия — для линейно поляризованного излучения, штриховая линия — для циркулярно поляризованного излучения.

ходов изменяются из-за динамич. поляризуемости атома (*Штарка эффект* в переносном поле). Для большинства частот излучения, когда промежуточные резонансы не возникают, процесс М. и. наз. *прямым* (рис. 2, справа); при наличии промежуточного резонанса с некими возбуждённым состоянием  $\epsilon_p$  — *резонансным* и не  $\epsilon_i$  (рис. 2, слева). Вероятность прямого процесса М. и. описывается приведённым выше степенным соотношением; вероятность резонансного процесса определяется свойствами резонансного состояния.

М. и. не имеет порога по интенсивности излучения, однако для реализации достаточно большой вероятности М. и. необходима очень большая интенсивность излучения, достижимая лишь при использовании *лазеров*. Процесс М. и. большинства атомов, а также молекул детально изучен экспериментально. Методом нестационарной теории возмущений выполнено

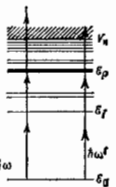


Рис. 2. Схема процесса многофотонной ионизации: справа — прямой процесс; слева — резонансный.

большое число расчётов сечений М. и. Результаты расчётов удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов.

М. и. характерна для взаимодействия интенсивного лазерного излучения с разреженными газами; в плотных газах при давлениях от неск. торр и выше происходит лавинная ионизация (см. *Лавина электронная*).

Большая вероятность М. и. при больших интенсивностях излучения приводит к отсутствию красной границы ( $\omega = U_{и}/h$ ) при взаимодействии излучения (в част. случае, света) с газами, т. е. к отсутствию области прозрачности за счёт появления многофотонного поглощения излучения.

Резонансный процесс М. и. лежит в основе метода многофотонной резонансной спектроскопии, к-рый характеризуется высокой селективностью по частоте и большой эффективностью регистрации.

Процесс М. и. в твёрдых телах наз. *многофотонным фотоэффектом*.

Лит.: Делоне Н. Б., Крайнов В. П., Атом в сильном световом поле, 2 изд., М., 1984; Раиодорф Л. П., Зинов А. А., Мажиков Н. Л., Теория многофотонных процессов в атомах, М., 1978; Делоне Н. В., Взаимодействие лазерного излучения с веществом, М., 1989. Н. Б. Делоне. **МНОГОФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ** — процесс взаимодействия эл.-магн. излучения с веществом, при к-ром в одном элементарном акте поглощаются несколько ( $m$ ) фотонов; в среде при этом совершается многофотонный ( $m$ -фотонный) квантовый переход из нач. состояния  $|1\rangle$  с энергией  $\epsilon_1$  в состояние  $|2\rangle$  с энергией  $\epsilon_2$  (рис. 1). Проявляется М. п. в ослаблении падающих

потоков излучения и в соответствующем возбуждении облучаемого вещества. Процесс, обратный М. п., — многофотонное индукции, испускание под действием того же излучения, сопровождающееся квантовым переходом в атоме вещества из возбуждённого состояния [2] в нижнее [1].

Состояние [2] может относиться как к дискретному, так и к непрерывному спектру. Если [2] принадлежит ионаизац, континууму атома или молекулы, то результатом М. п. является *многофотонная ионизация*; если же [2] относится к непрерывному спектру колебат.

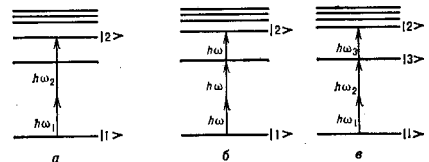


Рис. 1. Примеры процессов многофотонного поглощения: а — двухфотонное поглощение; б — вырожденное по частоте трёхфотонное поглощение; в — трёхфотонное поглощение при наличии промежуточного двухфотонного резонанса.

состояний молекулы, то следствием М. п. является *красная многофотонная диссоциация*.

Для описания процессов М. п. используют квантово-механическую *возмущенную теорию*. Если падающее излучение содержит монохроматич. компоненты на частотах  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$  с интенсивностями  $I_1, I_2, \dots, I_m$  соответственно, то для вероятности  $m$ -фотонного перехода из состояния [1] в состояние [2] теория возмущений даёт:

$$W_{12}^{(m)}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \propto |Q_{12}^{(m)}|^2 |I_1 I_2 \dots I_m g(\Delta)|. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta = \omega_{21} - \sum_{i=1}^m \omega_i$  — разность собств. частоты

$\omega_{21} = (\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1)/\hbar$  и суммы частот поглощаемых фотонов; ф-ция  $g(\Delta)$  отражает резонансный характер М. п. Для переходов между дискретными уровнями часто применима аппроксимация:  $g(\Delta) = \gamma_{21}/(\Delta^2 + \gamma_{21}^2)$ , где  $\gamma_{21}$  — однородная полуширина перехода. Т. п. составной матричный элемент  $Q_{12}^{(m)}$  в теории многофотонных процессов аналогичен матричным элементам переходов для одnofотонного поглощения и испускания. Наиб. простой вид  $Q_{12}^{(m)}$  принимает для нашего из процессов М. п. — двухфотонного поглощения ( $m = 2$ ); в электродипольном приближении

$$Q_{12}^{(2)} = \frac{1}{\hbar} \sum_n \left[ \frac{(d_{1n} \cdot e_1)(d_{n2} \cdot e_2)}{\omega_{n1} - \omega_1} + \frac{(d_{1n} \cdot e_2)(d_{n2} \cdot e_1)}{\omega_{n1} - \omega_2} \right]. \quad (2)$$

где  $d_{ij}$  — матричные элементы оператора дипольного момента,  $e_i$  — орт-вектор поляризации полей на частотах  $\omega_i$ . Суммирование в (2) производится по всем промежуточным состояниям  $n$ .

Ф-лы типа (1) и (2) для двухфотонного поглощения были получены М. Гейперт-Майер (М. Goerpert-Mayer) ещё в 1931, однако экспериментально этот эффект был обнаружен только после создания лазеров, т. к. интенсивности обычных источников излучения недостаточны для его регистрации.

Из (1), (2) следуют осп. особенности М. п. 1) Правила отбора для М. п. определяются составным матричным элементом  $Q_{12}^{(m)}$  и отличаются от таковых для одnofотонного поглощения. Так, в дипольном приближении двухфотонные переходы разрешены между состояниями одинаковой чётности, тогда как одnofотонные — между состояниями разной чётности (см. *Отбора правила*).

Для атомов с одним валентным электроном правила отбора для орбитальному ( $L$ ) и магнитному ( $M$ ) квантовым числам имеют вид:

$$\Delta L = -m, -m + 2, \dots, m - 2, m;$$

$$\Delta M = q_1 + q_2 + \dots + q_m,$$

где  $q_i = 0, \pm 1$  для линейной (0)  $\pi$ , правой (+) и левой (−) круговой  $\sigma^\pm$  поляризации излучения. Благодаря иным правилам отбора спектры М. п. содержат новую информацию о веществе, отсутствующую в спектрах одnofотонного поглощения (рис. 2).

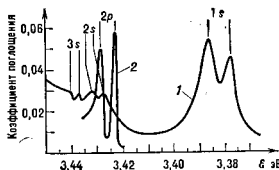


Рис. 2. Спектры одnofотонного (кривая 1) и двухфотонного (2) поглощений в ZnO. Согласно правилам отбора, в одnofотонном спектре возникают только  $\sigma$ -виситные линии, в двухфотонном — только  $\pi$ -виситные линии.

2) Мощность, поглощаемая на частоте  $\omega_i$  единицей объёма, равна  $P_i = \hbar \omega_i W_{12}^{(m)} (N_1 - N_2) (N_{1,2} - \dots)$  — плотность числа частиц в ниж. и верх. состояниях) и является величиной ф-цией интенсивности падающего излучения. В частности, если имеет место  $m$ -фотонное поглощение из одного монохроматич. пучка с интенсивностью  $I$  и изменением населённости  $N_i$  можно пренебречь, то  $P \propto I^m$ .

3) М. п. существенно зависит от поляризации излучения. Эта зависимость полностью определяется составным матричным элементом  $Q_{12}^{(m)}$  и имеет место даже в изотропных средах и в средах с кубич. симметрией (индукции, анизотропия).

4) Скорость М. п. резко возрастает, если хотя бы одна из частот излучения приближается к резонансу с переходом в промежуточное состояние или осуществляется промежуточный многофотонный резонанс.

5) В газовых средах, когда существует вклад в уширение линий даёт *Доплера эффект*, М. п. зависит от взаимной ориентации волновых векторов  $k_i$  падающего излучения. Атом (или молекула), движущийся со скоростью  $v$ , воспринимает частоту падающей световой волны, изменённую за счёт линейного эффекта Доплера на величину —  $k \cdot v$ . Суммарный доплеровский сдвиг для всех волн, участвующих в М. п., равен  $-\sum_{i=1}^m k_i \cdot v$ , т. е. пропорционален длине суммарного волнового вектора падающих волн  $\sum_{i=1}^m k_i$ . Очевидно, что соответствующим образом направлений распространения световых потоков можно существенно уменьшить влияние эффекта Доплера либо полностью его исключить, если  $\sum_{i=1}^m k_i = 0$ .

Для двухфотонного поглощения это достигается в случае встречных световых потоков с одинаковой частотой и используется в *нелинейной спектроскопии* сверхвысокого разрешения атомов и молекул.

Эффекты распространения монохроматич. эл.-магн. волн в условиях М. п. удобно описывать с помощью тензора *нелинейной восприимчивости*  $\chi^{(2m-1)}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$  (ранг тензора —  $2m$ ; см. *Нелинейная оптика*). Мнимая часть этого тензора  $\text{Im} \chi^{(2m-1)}$  ответственна за затухание волн в условиях  $m$ -фотонного поглощения; соответственно  $\text{Re} \chi^{(2m-1)}$  характеризует нелинейное изменение показателей преломления под действием падающих волн.

Распространение излучения в условиях М. п. описывается системой нелинейных уравнений для амплитуд (или интенсивностей) отд. потоков. Если на входе в среду интенсивность одного из потоков  $I_{m0}$  мала по сравнению с интенсивностью остальных, то затухание его на расстоянии  $z$  дается ф-лой:

$$I_m = I_{m0} \exp(-\chi_m I_1 I_2 \dots I_m z),$$

т. е. имеет вид, аналогичный закону Бугера для однофотонного поглощения. Здесь  $\chi_m$  — коэф., пропорциональный  $\text{Im}\chi^{(2m)}$  на частоте  $\omega_m$ . При вырожденном по частоте двухфотонном поглощении из одного монохроматич. пучка ( $2\omega = \omega_{21}$ ) затухание носит гиперболич. характер:

$$I = \frac{I_0}{1 + \chi_2 I_0 z^2}, \quad \chi_2 = \frac{8\pi^2 \omega_0}{c^2} \text{Im}\chi^{(3)}(\omega)$$

( $n$  — показатель преломления).

Как видно из приведённых ф-л, М. п. увеличивается с ростом интенсивности падающего излучения. Этим объясняется т. н. эффект затенения: вещества, прозрачные для слабых потоков излучения данной частоты, при увеличении интенсивности могут оказаться сильно поглощающими за счёт возрастания М. п. Дальнейшее увеличение интенсивности может вызвать просветление вещества, связанное с насыщением многофотонного перехода (см. *Насыщения эффект, Просветления эффект*).

Наиб. высокие интенсивности требуются для наблюдения двухфотонного поглощения ( $m = 2$ ). Напр., для межзонных переходов в полупроводниках и диэлектриках  $\chi_2 \sim 10^{-6} \div 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/Вт, т. е. заметное ослабление пучка за счёт двухфотонного поглощения достигается при интенсивностях  $\sim 10^9 \div 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Однако, если регистрировать М. п. косвенными методами, напр. по измерению интенсивности люминесценции, возбуждаемой многофотонным поглощением, то в ряде случаев достаточными оказываются интенсивности падающего излучения  $\sim 1 \div 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>.

Для регистрации М. п. используются также фотоионизация атомов и молекул с уже возбуждённого уровня, эффект многофотонной фотопроводимости и ряд др. методов.

В поле коротких импульсов, длительность к-рых меньше времени релаксации квантового перехода между уровнями |1> и |2>, при М. п. возможно проявление нестационарных когерентных эффектов, таких, как *затухание свободной поляризации, оптическая нутация, самоиндуцированная прозрачность*.

Процессы М. п. очень важны в квантовой электронике, нелинейной оптике, фотохимии и т. д. Они используются для оптич. накачки лазерных сред, измерения длительности коротких световых импульсов, управления параметрами лазерного излучения, селективного воздействия на атомы и молекулы при лазерном разделении изотопов. На основе М. п. разработана целый ряд методов нелинейной спектроскопии, к-рые широко применяются для исследования квантовых переходов в атомах и молекулах, энергетич. спектра возбуждённых в полупроводниках и т. д.

*Lum. G. B r e t t - M a y e r M., Über Elementarakte für multiphoton Einfluss- und Kondensationsmaschinen, «Ann. Phys.» 1931, Bd 9, S. 273; K i s e l o v W., B r e t t C., Two-photon excitation in CaF<sub>2</sub>, Eu<sup>2+</sup>, «Phys. Rev. Lett.», 1961, v. 7, p. 229; D i e g e r R. и др., Two-photon magnetooptics in ZnO<sup>2+</sup>, «Phys. Rev. Lett.», 1970, v. 25, p. 922; В р е д я к и н В. И., Г а л а и н М. Д., Г р е к и в В. Н., Двухфотонное поглощение и оптоэлектроника, «УФН», 1973, т. 110, с. 3; Л о у д о н Р., Квантовая теория света, пер. с англ., М., 1976; Нелинейная спектроскопия, под ред. Н. Бломбергена, пер. с англ., М., 1979; Д е с о х о в Б. С., Нелинейные селективные фотопроцессы в атомах и молекулах, М., 1983; Ш е й н Я. Р., Физика нелинейной оптики, пер. с англ., М., 1989.*

*К. Н. Дробочев.*

**МНОГОФОТОННЫЕ ПРОЦЕССЫ** — процессы взаимодействия эл.-магн. излучения с веществом, при к-рых в одном элементарном акте происходит поглоде-

ние или испускание (или и то и другое) неск. фотонов. При этом в вещество совершается многофотонный переход между квантовыми состояниями |1> и |2>, причём разность энергий конечного |2> ( $\epsilon_2$ ) и начального |1> ( $\epsilon_1$ ) состояний равна разности энергий поглощённых и испущенных фотонов.

В рамках квантовой механики теория возмущений многофотонный переход из нач. состояния |1> в конечное |2> трактуется как результат последовательности однофотонных квантовых переходов через промежуточные виртуальные состояния (см. *Возмущений теория*). При М. п. населённость промежуточных уровней энергии не меняется, в отличие от ступенчатых (каскадных) процессов, при к-рых переход в состояние |2> совершается в результате двух или более элементарных актов взаимодействия.

Возможность тех или иных М. п. определяется *отбора правилами* для соответствующих многофотонных переходов. Эти правила существенно отличаются от таковых для однофотонных процессов поглощения и испускания. Напр., однофотонные элктрич. дипольные переходы между состояниями с одинаковой чётностью запрещены правилами отбора, в то же время такой запрет по чётности отсутствует для многофотонных переходов между этими состояниями с участием чётного числа фотонов.

М. п. составляют физ. основу широкого круга разнообразных эффектов, проявляющихся в изменении характеристик эл.-магн. излучения, а также свойств и состояния вещества. К ним относятся *многофотонное поглощение* и испускание, *многофотонная ионизация атомов* и молекул, *многофотонный фотоэффект*, широкий класс процессов рассеяния света и т. п. Каждый фотон, возникающий при М. п., может испускаться либо спонтанно, либо под действием внеш. излучения. В соответствии с этим М. п. делится на спонтанные и вынужденные (индуцированные), также, как спонтанное и вынужденное рассеяние света, спонтанное и вынужденное многофотонное излучение (см. также *Комбинационное рассеяние света, Манделштама — Бриллюэна рассеяние*).

М. п., при к-рых конечное квантовое состояние |2> соответствует многофотонного перехода совпадает с исходным |1>, наз. когерентными, т. к. в этом случае фазы взаимодействующих волн оказываются жестко связанными между собой. К когерентным М. п. относятся генерация гармоник, процессы сложения и вычитания частот оптич. излучения, параметрич. генерация и усиление и т. п. (см. *Нелинейная оптика*).

Количеством характеристичной  $m$ -фотонного процесса может служить вероятность соответствующего  $m$ -фотонного перехода  $W_m$ . Для вынужденных М. п. в поле монохроматич. потоков излучения с частотами  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$  вероятность  $W_m$  можно представить в виде:  $W_m = A_m n_1 n_2 \dots n_m$ , где  $n_1, n_2, \dots, n_m$  — плотности числа фотонов с соответствующими энергиями  $\hbar\omega_1, \hbar\omega_2, \dots, \hbar\omega_m$ . Т. о., скорость вынужденных М. п. является нелинейной ф-цией интенсивности падающего поля. Константа  $A_m$  зависит от вида энергетич. спектра поглощения вещества, типа М. п., частоты и поляризации падающего излучения. Если, напр., к-л. из частот возбуждённого излучения или их комбинация оказываются близкой к частоте перехода из начального в промежуточное квантовое состояние, то величина  $A_m$ , а следовательно, и вероятность  $W_m$  резонансным образом возрастает. При этом резко возрастает и скорость соответствующих ступенчатых процессов. Т. о., наличие промежуточных резонансов ведёт к одноврем. проявлению многофотонных и ступенчатых процессов. Такая ситуация имеет место, напр., в случае резонансной флуоресценции, резонансного комбинац. рассеяния, резонансной многофотонной ионизации и т. д.

Довольно часто встречается ситуация, когда между уровнями |1> и |2> возникает неск. каналов перехода. Напр., если в спектре действующего излучения содер-

жатся компоненты с такими частотами, что  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 - \omega_4 = \omega_{21} = (E_2 - E_1)/h$ , то возбуждение уровня [2] происходит как за счёт двухфотонного поглощения квантов с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , так и за счёт комбина. взаимодействий излучений на частотах  $\omega_3$  и  $\omega_4$ . Аналогично, при генерации третьей гармоники в условиях трёхфотонного резонанса ( $\omega_3 = 3\omega_1 = \omega_{21}$ ) наряду с трёхфотонным поглощением излучения с частотой  $\omega_1$ , присутствуют также однофотонное поглощение квантов гармоники ( $\omega_3$ ), возбуждающее уровень [2]. В этих и подобных случаях полная вероятность перехода между состояниями [1] и [2]  $W_{12}$  определяется суммой амплитуд вероятностей перехода по каждому из каналов  $f_{12}^i$ , т. е.

$$W_{12} = \left| \sum_i f_{12}^i \right|^2 \text{ и, следовательно, зависит от соотношения } f_i \text{ между этими каналами.}$$

При этом возможно интерференционное усиление или ослабление (вплоть до полного подавления) всех одновременно действующих М. п. на этом переходе, а также сопутствующих им процессов, стартующих с уровня [2] (см. *Проектная аффект*).

Отношение вероятности М. п. с участием  $m$  фотонов к вероятности М. п. с участием  $(m-1)$  фотонов по порядку величины равно  $(E/E_{ат})^2$ , где  $E$  — амплитуда напряжённости электрич. поля излучения,  $E_{ат}$  — ср. напряжённость внутриатомного электрич. поля ( $E_{ат} \approx 10^8 - 10^9$  В/см). При  $E \ll E_{ат}$  с увеличением числа фотонов, участвующих в элементарном акте, вероятность М. п. резко снижается. Поэтому до появления лазеров кроме однофотонных наблюдались лишь двухфотонные процессы при рассеянии света: рассеяние Магделъштама — Бриллюана, комбинационное рассеяние света и т. п. Высокие интенсивности излучения, получаемые с помощью лазеров, позволяют наблюдать М. п. вплоть до  $m \geq 10$ .

При больших интенсивностях излучения М. п., возможные в данном веществе, в значит. мере определяют оптич. свойства этого вещества. Так, при достаточно высокой интенсивности падающего лазерного излучения прозрачные вещества могут стать непрозрачными за счёт процессов многофотонного поглощения. М. п. составляют физ. основу широкого круга нелинейных оптич. явлений. На их наблюдении часто базируется большинство методов *нелинейной спектроскопии*.

Литт.: В о н ч - В р у е в и ч А. М., Х о д о в о й В. А., Многофотонные процессы, «УФН», 1965, т. 85, в. 1; Л о у д о н Р., Квантовая теория света, пер. с англ., М., 1978; А л а н с е в и ч П. А., Основы теории взаимодействия света с веществом, Мимк, 1977; Д е л о н е Н. В., К р а в ч о в В. П., Атом в сильном световом поле, 2 изд., М., 1984; Д р а б о в и ч К. Н. и др., Интерференционные эффекты в нелинейных резонансных процессах, «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1989, т. 53, в. 4, с. 782.

**МНОГОФОТОННЫЙ ФОТОЭФФЕКТ** — термин, объединяющий ряд *фотоэлектрических явлений*, при к-рых изменение электропроводности, возникновение эдс или эмиссия электронов происходят вследствие поглощения электроном вещества (т. е. в связанном состоянии) двух или более фотонов в одном элементарном акте. Практически все разновидности *фотоэффекта* (внутренний, внешний, внешний) имеют свой многофотонный вариант, отличающийся тем, что электроны вещества приобретают необходимую энергию в процессе *многофотонного поглощения*, в то время как при «обычном» фотоэффекте требуется возбуждение электронов достигается за счёт однофотонного поглощения. Это обстоятельство обуславливает гл. особенности М. ф.: 1) М. ф. наблюдается при достаточно высоких интенсивностях  $I$  падающего излучения, достигаемых лишь с помощью лазеров; 2) величина фотоотклика вещества (фотоэдс, фототок) при М. ф. пропорциональна  $I^m$ , где  $m$  — порядок фотоэффекта, т. е. число фотонов, поглощаемых в одном акте; 3) зависимость М. ф. от частоты излучения отражает спектральные характеристики многофотонного поглощения.

Наиб. часто термин «М. ф.» употребляется по отношению к многофотонному внеш. фотоэффекту — многофотонной ионизации атомов и молекул в газах и многофотонной эмиссии электронов из конденсиров. сред. В этом случае энергия  $m$  поглощаемых фотонов ( $m h\nu$ ) затрачивается на преодоление энергии связи электрона в атоме или *работы выхода* электрона из вещества в вакуум или др. вещество.

В результате М. ф. при высоких интенсивностях излучения исчезает т. н. красная граница фотоэффекта: если энергии одного фотона  $h\nu$  недостаточно для преодоления работы выхода  $A$ , то эмиссия электронов может происходить за счёт  $m$ -фотонного поглощения.

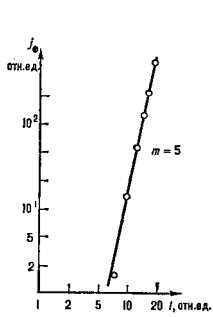


Рис. 1. Пятифотонная фотоэмиссия из золота под действием пикосекундных импульсов неидеального лазера.

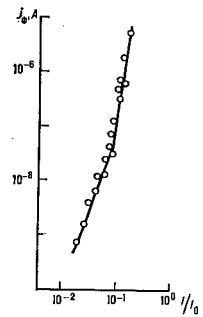


Рис. 2. Фототок под действием наносекундных импульсов резонансного лазера (наход из золота),  $I_0 = 14$  МВт/см<sup>2</sup>.

Фототок  $j_{\phi}$  при  $m$ -фотонной эмиссии электронов  $j_{\phi} = \gamma_{1m} I^m$  (рис. 1), где  $\gamma_{1m}$  — константа, определяемая структурой вещества, частотой и поляризац. излучения. Соответственно квантовый выход М. ф. пропорционален  $I^{m-1}$ , т. е. в отличие от однофотонной эмиссии зависит от интенсивности света.

Для поверхностного М. ф. в металлах характерна также более резкая поляризац. зависимость фототока:  $j_{\phi} \propto \sin^2 \theta \sin^{2m} \psi$ , где  $\theta$  — угол падения,  $\psi$  — угол между вектором напряжённости электрич. поля сетевой волны и плоскостью падения (см. *Металлооптика*).

Так как М. ф. может быть только при высоких интенсивностях падающего излучения, то его наблюдение в «чистом виде» возможно лишь при специально выбранных условиях эксперимента, исключающих влияние маскирующих факторов. Основным таким фактором, напр. в случае многофотонной фотоэмиссии, является термозлектронная эмиссия, обусловленная нагревом вещества под действием интенсивного светового излучения. На рис. 2 перегиб в зависимости фототока от интенсивности излучения объясняется тем, что осн. вклад при  $I < 1$  МВт/см<sup>2</sup> даёт фототок трёхфотонной эмиссии, а при  $I > 1$  МВт/см<sup>2</sup> — термоэмиссионный ток.

Для исключения маскирующих эффектов при М. ф. используются импульсы света пико- и фемтосекундной длительности.

Литт.: В о д н Д. К., Действие мощного лазерного излучения, пер. с англ., М., 1974; А н и с и м о в С. И., В и д е р с к и в В. А., Ф а р н а ш Д., Нелинейный фотоэлектрический эффект в металлах под действием лазерного излучения, «УФН», 1977, т. 122, с. 185.

К. Н. Драбович.

**МНОЖЕСТВЕННОСТЬ** — число вторичных адронов ( $n$ ), рождённых в одном акте взаимодействия частиц высоких энергий. При определ. энергии первичных частиц  $M$  сильно варьирует. Напр., при полной энергии в системе центра инерции (с. ц. и.)  $\sqrt{s} = 540$  ГэВ (ус-

коритель со встречными пучками протонов и антипротонов в ЦЕРНе) зарегистрированы события с М. вторичных зарядов частиц ( $n_{ch}$ ) от 2 до 80, тогда как с р е д я я М. ( $n_{ch}$ ) = 27(2) много меньше максимально возможного числа вторичных частиц, разрешённого законом сохранения энергии. Средняя М. ( $n_{ch}(s)$ ) в адронных взаимодействиях медленно растёт с увеличением энергии и описывается зависимостью:

$$\langle n_{ch}(s) \rangle = a_1 + b_1 \ln s + c_1 (\ln s)^2, \quad (1)$$

где  $a_1 = 0,88(10)$ ,  $b_1 = 0,44(05)$  и  $c_1 = 0,118(6)$  для  $\sqrt{s} \geq 5$  ГэВ. Так, в интервале энергий в с. п. от 5 ГэВ до 540 ГэВ ( $n_{ch}$ ) меняется от 5 до 27 (рис. 1).

В процессах аннигиляции адронов и позитронов в адроны,  $e^+e^- \rightarrow hX$  (где  $h$  — наблюдаемый адрон,  $X$  — совокупность остальных частиц), обнаружен более быстрый рост

$$\langle n_{ch}(s) \rangle = n_0 + a \exp[b \sqrt{\ln(s/\Lambda^2)}], \quad (2)$$

где  $\Lambda = 0,3$  ГэВ,  $n_0 = 2,0(2)$ ,  $b = 1,9(2)$ ,  $a = 0,027(10)$  для интервала  $\sqrt{s}$  от 2 до 40 ГэВ (рис. 2).

В то же время зависимость ( $n_{ch}$ ) от  $s$  примерно одинакова во всех типах процессов, если учесть, что в адронных соударениях б. ч. энергии тратится на образование т. н. лидирующих частиц (уносящих в ср. ок. 0,5 ч. энергии). Вероятность рождения  $n_{ch}$  частиц,  $k$ -рая является одной из существ. характеристик *множественных процессов*, удовлетворительно описывается выражением:

$$P(n_{ch}, s) \approx \psi(n_{ch}/\langle n_{ch}(s) \rangle) / \langle n_{ch}(s) \rangle, \quad \text{где}$$

$$\psi \approx \pi \langle n_{ch} / \langle n_{ch}(s) \rangle \rangle \exp(-1/4 \pi \frac{n_{ch}^2}{\langle n_{ch}(s) \rangle^2}),$$

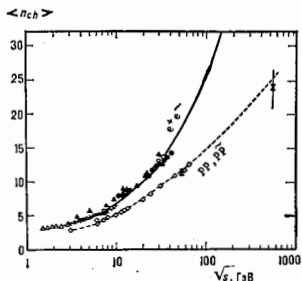


Рис. 2. Зависимость средней множественности заряженных частиц ( $n_{ch}$ ) от полной энергии в системе центра инерции  $\sqrt{s}$  для взаимодействий pp и p-pbar (пунктирная линия — формула (1)) и для  $e^+e^-$  (сплошная линия — формула (2)).

для  $\sqrt{s} \geq 10$  ГэВ и разл. типов первичных частиц и явно не зависит от энергии — т. п. скейлинг по множественности, или KNO-скейлинг (по имени Кобы (Z. Koba), Нильсена (H. B. Nielsen) и Олесена (P. Olesen)).

Лит.: Г р и н и В. Г. Инклюзивные процессы в адронных взаимодействиях при высоких энергиях. М., 1982; Фейнберг Е. Л., Термодинамические фейрболы, «УФН», 1983, т. 139, с. 3; Мурьян В. С., Сарычев А. Л., Взаимодействия адронов высоких энергий. М., 1983. В. Г. Гринин. **МНОЖЕСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ** — рождение большого числа вторичных адронов в одном акте взаимодействия частиц при высокой энергии. М. п. особенно характерны для столкновений адронов, и при энергиях выше неск. ГэВ они доминируют над процессами одиночного рождения частиц. М. п. наблюдаются и в соударениях др. частиц: в процессах аннигиляции электронов и позитронов в адроны и в *слабко неупругих процессах* взаимодействия лептонов с нуклонами. Впервые М. п. наблюдался в *космических лучах*; детальное их исследование началось после создания ускорителей заряд. частиц высоких энергий. Наиб. полно они изучены в т. н. мягких адрон-адронных взаимодействиях, в к-рых характерные поперечные к осн соударения импульсы вторичных частиц не превышают 1 ГэВ [1, 2]. Исследования М. п. существенно для выяснения структуры адронов и построения теории сильного взаимодействия. Особенно важно установление осн. закономерностей переходов *кварков и глюонов* в адроны, к-рые определяют неизвестным пока механизмом удержания (конфайнмента) кварков в *квантовой хромодинамике* (КХД) (см. *Удержание цвета*).

Из-за большого числа вторичных частиц (большой *множественности*) осн. метод изучения М. п. — инклюзивный (см. *Инклюзивный процесс*) [3]. Исследуются характеристики процессов:  $ab \rightarrow cX$ ,  $ab \rightarrow c_1c_2X$  в зависимости от энергии и типа первичных (a, b) и вторичных ( $c_1$ ,  $c_2$ ) частиц (X — совокупность остальных, не регистрируемых частиц). По этим процессам получены данные вплоть до полной энергии  $\sqrt{s} = 540$  ГэВ в системе центра инерции (с. п. и.).

Состав и множественность вторичных адронов. В мягких адронных соударениях среди вторичных доминируют частицы ( $\tau \geq 10^{-13}$  с), к-рые регистрируются эксперим. установками, доминируют пионы. Их доля несколько уменьшается от 0,9 до ~ 0,8 при увеличении энергии  $\sqrt{s}$  от 60 до 540 ГэВ. В этом же интервале энергий доля К-мезонов растёт от 0,06 до 0,12, а доля барионов и антибарионов — от 0,04 до 0,09. Вместе с тем эти долгоживущие адроны часто ( $\geq 80\%$ ) являются продуктами распада короткоживущих ( $\tau \leq 10^{-23}$  с) *резонансов*. Выделение этих состояний крайне сложно при большой множественности. Состав их в первом приближении соответствует рождению адронов *изотопически мультиплетами* (за исключением странных и очарованных частиц). С увеличением поперечных импульсов вторичных частиц до 5–10 ГэВ и в  $e^+e^-$ -аннигиляции доли пионов уменьшается до 0,55, а доля К-мезонов и пар нуклов — антинуклов увеличивается соответственно до 0,27 и 0,18. Ср. множественность пионов ( $\langle n(\pi) \rangle$ ) медленно растёт с увеличением энергии ( $\sim \ln^2 s$ ), в то время как  $\langle n(K) \rangle$  и  $\langle n(B) \rangle$  растут значительно быстрее, что связано с открытием новых каналов их образования ( $\bar{B}$  — антибарион).

Распределение адронов по поперечному импульсу. Одной из главных закономерностей М. п. является относительно небольшая величина поперечных импульсов ( $p_{\perp}$ ) вторичных частиц. Ср. поперечный импульс ( $\langle p_{\perp} \rangle$ ) вторичных адронов значительно меньше их полного импульса ( $\langle p_{\perp} \rangle \approx \sqrt{s} / \langle n \rangle$ ) и очень медленно растёт с энергией (используется система единиц, в к-рой скорость света  $c = 1$ ); напр., он увеличивается от 0,360(10) ГэВ при  $\sqrt{s} \approx 20$  ГэВ до 0,420(30) ГэВ при

$\sqrt{s} = 540$  ГэВ. Поэтому вторичные частицы вылетают резко направленными и сжимаются по мере роста энергии потоками вдоль направления движения сталкивающихся частиц — т. е. *струями адронными* (в с. п. и. — вперёд и назад, в лаб. системе — по направлению движения вылетающей частицы). При высоких энергиях с небольшой вероятностью ( $\leq 0,01$ ) рождаются также адроны с большими значениями  $p_1$  ( $\gtrsim 1$  ГэВ) в виде адронных струй, вылетающих под большими углами к оси столкновения. При этом поведение по  $p_1$  из экспоненциального становится степенным ( $\sim 1/p_1$ ). В модели *партонов* оно определяется сечением упругого рассеяния на большие углы составляющих адронов — кварков и глюонов [1].

Адронные струи в М. п. наблюдаются и в  $e^+e^-$ -аннигиляции, когда образуется пара из кварка и антикварка, к-рые затем фрагментируют в адроны. В этих процессах поперечный импульс адронов относительно оси струй также мал ( $\langle p_1 \rangle = (0,4-0,5)$  ГэВ). Ср. поперечный импульс адронов практически не зависит от их массы. Прямые измерения  $\langle p_1 \rangle$  резонансов (R) показали, что  $\langle p_1(R) \rangle = 0,50(3)$  ГэВ в широком интервале энергий. В то же время для долгоживущих частиц  $\langle p_1 \rangle$  растёт с увеличением массы адрона. Это связано не с динамикой рождения адронов в М. п., а с кинематикой распада резонансов на пионы и К-мезоны.

Распределение резонансов по  $p_1^2 < 1$  ГэВ<sup>2</sup> описывается ф-лой:

$$\frac{dN(R)}{Nd p_1^2} \sim \exp(-B(R)p_1^2),$$

где  $B = 3,4(2)$  ГэВ<sup>-2</sup> для  $\eta$ ,  $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\rho$ ,  $f$ ,  $\Delta$  и др. резонансов с массами  $< 2$  ГэВ ( $N$  — полное число наблюдаемых резонансов). *Импульсное сечение* образования долгоживущих частиц и резонансов с массами  $m$  от 0,14 ГэВ ( $\eta$ -мезон) до 3,1 ГэВ ( $J/\psi$ -частица) хорошо аппроксимируются выражением:

$$\sigma \frac{d\sigma}{dp} \sim s^{\alpha} \exp(-\sqrt{m^2 + p_1^2}/T),$$

где  $\sigma d\sigma/dp$  — инклюзивное сечение ( $\sigma$  — энергия,  $p$  — импульс частицы),  $T \approx 120$  МэВ и  $\alpha \approx 0,15-0,30$  в зависимости от типа адронов.

Примерно такие же распределения адронов по поперечным импульсам относительно оси струй получены в глубоко неупругих процессах и в  $e^+e^-$ -аннигиляции. Постоянство этих характеристик вторичных адронов и небольшая величина их ср. поперечного импульса в реал. М. п. широко используются во всех теоретич. моделях и в точки зрения совр. представляющей связываются с размерами области удержания кварков и глюонов ( $r \approx 1/\langle p_1 \rangle \approx 0,5$  Ф).

**Распределение адронов по продольным переменным** ( $x, y$ ). Характеристики М. п. в зависимости от  $x = 2p_1/\sqrt{s}$  или продольной *быстроты*  $y = 1/2 \ln[(\sigma + p_1)/(\sigma - p_1)]$  [где  $y \approx \eta = -\ln(tg(\theta/2))$ ] изучены в широком интервале энергий [ $\sqrt{s} = (5-540)$  ГэВ]. Здесь  $\sigma$ ,  $p_1$  и  $\theta$  — соответственно энергия, продольный импульс и угол вылета адрона в с. п. и. Одна из важных закономерностей М. п. — *масштабная инвариантность* — закон подобия в микромире, заключающийся в том, что вероятность рождения «инклюзивной» частицы с с определ. значением продольного импульса ( $p_1$ ) при равных энергиях столкновения является универсальной ф-цией от переменной  $x = p_1/p_{\text{макс}}$  при  $x \gtrsim 0,1$ , где  $p_{\text{макс}} \approx \sqrt{s}/2$  — максимально возможно (при данной

энергии) значение  $p_1$  частицы с [4]. Т. о., продольные импульсы вторичных адронов растут пропорц. энергии столкновения ( $\sim \sqrt{s}$ ). В партоновой модели это свойство является естественным, причём поведение  $p_1$   $x$  определяется *структурной функцией* фрагментирующего адрона (т. е. исходного адрона с тем же направлением импульса) (см. *Кварковый счёт правца*). Первые указания на масштабную инвариантность были получены при изучении взаимодействия космических лучей, однако как закономерность она была установлена в экспериментах на Серпуховском ускорителе для отношений выходов К<sup>+</sup> и  $\rho/\pi$  (1968). Масштабная инвариантность наблюдается также при аннигиляции  $e^+e^-$  в адроны и в глубоко неупругих процессах. Её теоретич. интерпретация дается в рамках партоновой модели [Р. Фейнман (R. Ph. Feynman), 1969] [4].

Наряду с постоянством выхода частиц в области фрагментации ( $x \gtrsim 0,1$ ), было установлено, что в центр. области ( $x \leq 0,1$ ) инклюзивные сечения образования адронов в М. п. растут с увеличением энергии. Напр., при  $y \approx \eta \approx 0$  нормированное инклюзивное сечение  $[1/(0)(d\sigma/d\eta)]_{\eta=0}$  увеличивается пропорц.  $\ln \sqrt{s}$ , что и обеспечивает рост полной с. множественности ( $\sim \ln^2 s$ ).

Корреляции в рождении адронов в М. п. изучены в широкой области энергий с помощью *корреляционных функций*

$$C(y_1, y_2) = \frac{1}{\sigma_{\text{ин}}} \frac{d^2\sigma(y_1, y_2)}{dy_1 dy_2} - \frac{1}{\sigma_{\text{ин}}} \frac{d\sigma}{dy_1} \frac{d\sigma}{dy_2},$$

где  $\sigma_{\text{ин}}$  — полное неупругое сечение взаимодействия первичных частиц, а  $y_1, y_2$  — продольные быстроты вторичных инклюзивных частиц. Были обнаружены сильные положит. корреляции при разности быстрот инклюзивных частиц  $L = y_1 - y_2 \leq 2$  (близкодействующие корреляции), особенно для частиц с разными зарядами. При относительно малых множественностях ( $n \leq 10$ ) они в осн. объясняются интенсивным рождением лёгких резонансов [ $m(R) \leq 1,5$  ГэВ], распадающихся на 2-3 долгоживущих адрона. При больших множественностях ( $n > 10$ ) они связаны с распадом более тяжёлых резонансов или др. короткоживущих состояний — кластеров (файрболов) [5].

При высоких энергиях ( $\sqrt{s} \gtrsim 50$  ГэВ) всё более отчетливо проявляются и корреляции между множественностями частиц, летящих вперёд и назад в с. п. и. Они имеют дальнедействующий характер: чем больше рождается частиц, летящих вперёд, тем больше их летит и назад. Такие корреляции характеризуют процесс в целом. Механизм этих корреляций обычно связывают с увеличением (с ростом энергии) числа промежуточных партоновых «лесенок» в модели *мультипериферического взаимодействия*, что и приводит к сильным корреляциям по множественности типа «вперёд — назад».

Отмеченные особенности М. п. практически одинаковы в мягких и жестких процессах соударения частиц высоких энергий. Это означает, что процесс перехода партонов (кварков и глюонов) в адроны слабо зависит от способа их образования и имеет универсальный характер, к-рый, вероятно, определяется свойствами вакуума КХД.

Перечисленные закономерности М. п. сначала описывались в рамках мультипериферич. моделей [5]. После открытия партонов кинематика М. п. широко использовалась при создании феноменологич. кварк-глюонных моделей М. п., в к-рых учитывались известные характеристики кварков и глюонов [6, 7]. Некоторые черты одночастичных инклюзивных процессов в интервале энергий  $\sqrt{s} = 5-540$  ГэВ удовлетворительно описываются в модели кварк-глюонных струй [6] и в аддитивной кварковой модели [7]. Параметры в этих моделях находятся из сравнения их с экспериментом. Вычисление значений этих параметров в рамках КХД пока невозможно из-за сильного взаимодействия кварков на

больших расстояниях. Вместе с тем описание многочисл. данных по М. п. с помощью этих моделей даёт возможность найти структурные элементы будущей теории сильного взаимодействия.

Лит.: 1) Грин и В. Г. Интлюзивные процессы в адронных взаимодействиях при высоких энергиях, М., 1982; 2) Мурзин В. С., Сармичева Л. И., Взаимодействие адронов высоких энергий, М., 1983; 3) Лоджичю А. М., Матвеев В. С., Мухоморов А. А., Нгуен Ван Ниеу, Препринт ИФЭФ 67-49-К, Серпухов, 1987; 4) Логунов А. А., Мествиришвили Д. М., Петров В. А., Интлюзивные процессы в динамике сильных взаимодействий, *СФАП*, 1983, т. 14, в. 3, с. 483; 5) Фейнман Р., Взаимодействие фотонов с адронами, пер. с англ., М., 1975; 6) Фейнберг Е. Л., Термодинамические фибрилы, *УФН*, 1983, т. 139, с. 3; 7) Андреев В. В., Дороницын И. М., Мухоморов А. М., Матвеев В. С., Андреев В. В., Тер-Мартиросян К. А., Множественное рождение адронов при высоких энергиях в модели кварк-глюонных струн. Сравнение с экспериментом, *СФАП*, 1984, т. 40, с. 211; 7) Анисимов В. В. и др., Адипативная кварковая модель и процессы множественного рождения адронов, *УФН*, 1984, т. 144, в. 4, с. 553.

**МНОЖЕСТВО** — набор, совокупность, собрание к-л. объектов, называемых его элементами, обладающих общим для всех них характеристик. свойством. Понятие М. принадлежит к числу первоначальных матем. понятий и может быть пояснено только при помощи примеров. Так, можно говорить о М. людей, живущих на нашей планете в данный момент времени, о М. точек данной геом. фигуры, о М. решений данного дифференциального уравнения. Люди, живущие на нашей планете в данный момент времени, точки данной геом. фигуры, решения данного дифференциального уравнения являются элементами соответствующего М. Множество А считается заданным, если указано характеристич. свойство элементов этого М., т. е. такое свойство, к-рым обладают все элементы этого М., и только оно. Для обозначения того, что элемент а принадлежит М. А, пишут  $a \in A$  (если а не принадлежит А, то пишут  $a \notin A$ ). Может случиться, что характеристич. свойством, определяющим М. А, не обладает вообще ни один элемент, тогда говорят, что М. А пустое, и пишут  $A = \emptyset$ . Напр., М. действительных решений уравнения  $x^2 = -1$  пустое. Если каждый элемент М. А является в то же время элементом М. В, то А наз. подмножеством В и пишут  $A \subset B$ . Если одновременно выполняются  $A \subset B$  и  $B \subset A$ , то говорят, что М. А и В равны и пишут  $A = B$ . Объединением  $A \cup B$  М. А и В наз. М., состоящее из всех элементов, принадлежащих хотя бы одному из М. А и В. Пересечением  $A \cap B$  М. А и В наз. М., состоящее из всех элементов, принадлежащих как А, так и В. Операции объединения и пересечения коммутативны, ассоциативны и взаимно дистрибутивны. Напр.,  $(A \cup B) \cap C = (A \cap C) \cup (B \cap C)$ . Наряду с данными двумя М. А и В рассмотрим М. С, элементами к-рого являются всевозможные пары  $(a, b)$ , где  $a \in A$ ,  $b \in B$ . М. все таких пар наз. к-р. произведением М. А и В и обозначается  $A \times B$ . Напр., евклидова плоскость  $R^2 = R^1 \times R^1$  является произведением двух неств. прямых  $R^1$ . Если каждому элементу  $a \in A$  поставлен в соответствие нек-рый элемент  $f(a) \in B$ , то говорят, что задано отображение  $f$  М. А в М. В (записывается  $f: A \rightarrow B$ ), и называют точку  $f(a)$  образом а в М. В. Если  $f(a) = b$ , то  $f$  наз. отображением «а» в  $b$ . Если  $f(a) = C \subset B$ , то  $f$  наз. отображением «а» в  $C$ , в случае, когда  $f(a) = B$ ,  $f$  наз. сюръективным отображением или отображением «на». Отображение  $f: A \rightarrow B$  наз. инъективным или вложением, если из  $a_1, a_2 \in A$  и  $a_1 \neq a_2$  следует  $(f(a_1) \neq f(a_2))$ . Отображения, одновременно инъективные и сюръективные, наз. биекциями или взаимно однозначными соответствиями.

Часто рассматривают только такие М., к-рые содержатся в нек-ром фиксир. М. X. Если А — подмножество X и P — свойство, характеризующее элементы из А, то пишут  $A = \{x \in X : P(x)\}$ , где  $P(x)$  означает, что свойство P выполнено для x (двоеточие заменяет

слова «такое, что»). Напр., если  $X = M$  всех действит. чисел, а А — подмножество положит. чисел, то  $A = \{x \in X : x > 0\}$ . Если  $A \subset X$ , то  $M \setminus A = \{x \in X : x \notin A\}$  наз. дополнением М. А. Операции объединения, пересечения и дополнения связаны т. н. законами де Моргана, напр.:  $X \setminus (A \cap B) = (X \setminus A) \cup (X \setminus B)$ .

Между двумя конечными М. можно установить биекцию тогда и только тогда, когда оба М. состоят из одного и того же числа элементов. Обобщая этот факт, Г. Кантор (G. Cantor, 1871—83) определил количество элементов эквивалентности, или равномогущности бесконечных М. как возможность установить между двумя М. взаимно однозначное соответствие. Если М. А равномогуще М. В, то говорят, что А и В имеют одно и то же кардинальное число. Ценность понятия мощности М. определяется существованием неравномогущных бесконечных М. Напр., М. всех действит. чисел и М. всех натуральных чисел имеют разные мощности. Первое имеет мощность континуума, а второе — счётное М. Т. о., бесконечность М. допускает расчленение на разные ступени матем. бесконечности, к-рым соответствуют разл. кардинальные числа, образующие шкалу мощностей. Предположение о месте мощности континуума в этой шкале (точнее, о совпадении континуума с первой несчётной мощностью) наз. континуум-гипотезой. Отметим, что в каждом бесконечном М. А имеется subset, подмножество, равномогущее всему А (правильная часть М.), в то время как н. в. в одном конечном М. такой правильной части найти нельзя. Поэтому наличие правильной части, равномогущей целому, можно принять за определение бесконечного М.

Использование теоретико-множеств. конструкций в физике, как правило, опосредованно и происходит в осн. через такие матем. дисциплины, как функциональный анализ, динамика, системы, теория групп, топология, алгебра, геометрия, нестандартный анализ и др. Классич. пример — формализация *дельта-функции* Дирака  $\delta(x)$ , к-рую физик представляет, напр., как точечную единичную массу бесконечной плотности, а математик — как отображение М. финитных ф-ий на прямую, т. е. функционал на пространстве финитных ф-ий. Др. пример — это моделирование ал-гам. поля или поля Янга — Миллса как *связностей* на специальных геом. объектах (*расщеплениях*), заданных на всей пространств. E и M и отображением  $f: E \rightarrow M$ , если M — модель пространств-времени, а  $f^+(m)$  — пространств. внутр. состояний точки  $m \in M$ . Такой подход является существ. шагом в единой теории поля. Многообещающим выглядит использование нестандартного анализа для нового построения квантовой механики и статистич. физики, где формализуются, напр., такие физ. конструкции, как бесконечные флуктуации поля в бесконечно малой области.

Лит.: Бурбаки Н., Начала математики, ч. 1— Основные структуры анализа, кн. 1— Теория множеств, пер. с франц., М., 1980; Стеллер Р. М., Множества, Логика, Алгебра, Комбинаторские теории, пер. с англ., М., 1988; Fugate G. M., Application of nonstandard analysis to quantum mechanics, *J. Math. Phys.*, 1978, в. 16, № 2, p. 177; Александров П. С., Введение в теорию множеств и общую топологию, М., 1977; Мания Ю. И., Докладное и недокладное М., 1979; Готтше К., Каллибровские поля и комплексная геометрия, М., 1984; Девис С. М., Прикладной нестандартный анализ, пер. с англ., М., 1980; Катлер Р., Группы теории множеств, пер. с нем., франц., М., 1985; Nonstandard methods in stochastic analysis and mathematical physics, Orlando — la. o. l., 1986; Архангельский А. В., Канторовская теория множеств, М., 1988.

Б. А. Ефимов.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ** физическое — эксперим. метод научного исследования, состоящий в замене изучаемого физ. процесса, явления или объекта другим, ему подобным — моделью. Геометрически подобная оригиналу модель объекта имеет или уменьшенный, или увеличенный по сравнению с оригиналом размер, а модель процесса или явления может отличаться от реального процесса количественными физ. характеристиками, такими, как мощность, энергия процесса,



давление, плотность среды, амплитуды колебаний, силы взаимодействия и т. п. В широком смысле всякий физ. эксперимент, проводимый в лаборатории в т. ч. и эксперимент с натурным объектом или его частью, является моделированием (см. также *Молекулярной физики жидк.*).

**Основные понятия и условия М.** В основе М. лежат *подобия теории и размерностей анализ*, устанавливающие *подобия критерии*, равенство  $k$ -рых для натурн и модели обеспечивает возможность переноса эксперим. результатов, полученных путём физ. М., на натурные условия. При выполнении надлежащих условий М., т. е. при равенстве критериев подобия, значения перем. величин, характеризующих реальное явление (натуру), пропорциональны в сходственных точках пространства и в сходственные моменты времени значениям тех же величин для модели. Наличие такой пропорциональности позволяет производить пересчёт эксперим. результатов, получаемых для модели, на натуру путём умножения каждой из определяемых величин на постоянный для всех величин данной размерности множитель — коэф. подобия.

Поскольку физ. величины связаны определ. соотношениями, вытекающими из законов и ур-ний физики, то, выбрав нек-рые из них за основные, можно коэф. подобия для всех других, производимых величин выразить через коэф. подобия величин, принятых за основные. Напр., в механике осн. величинами считают обычно длину  $l$ , время  $t$  и массу  $m$ . Тогда, поскольку скорость  $v = l/t$ , коэф. подобия скоростей  $k_v = v_M/v_m$  (индекс «м» — у величин для натурн, «М» — для модели) можно выразить через коэф. подобия длин  $k_l = l_M/l_m$  и времён  $k_t = t_M/t_m$  в виде  $k_v = k_l/k_t$ . Аналогично, на основании 2-го закона Ньютона сила  $F$  связана с ускорением  $w$  соотношением  $F = mw$ , поэтому  $k_F = k_m \cdot k_w$  (где в свою очередь  $k_w = k_l/k_t$ ). Из наличия таких связей вытекает, что для данного физ. явления нек-рые безразмерные комбинации величин, характеризующих это явление, должны иметь для модели и натурн одно и то же значение. Эти безразмерные комбинации физ. величин наз. критериями подобия. Равенство критериев подобия для модели и натурн является необходимым условием М. Однако добиться этого равенства можно не всегда, т. к. не всегда одновременно удовлетворяются все критерии подобия. При соблюдении необходимых условий М. удаётся результаты небольшого числа опытов, представленные в виде зависимости между соответствующими критериями подобия, распространить на целый класс подобных физ. процессов или явлений, охватывающих широкий диапазон размерных физ. параметров. Построение таких критериев зависимости часто и является основной целью М.

В осн. к М. прибегают при исследовании разл. механических (включая гидроаэромеханику и механику деформируемого твёрдого тела), тепловых и электродинамич. явлений. При этом число и вид критериев подобия для каждого моделируемого явления зависит от его природы и особенностей. Так, для задач динамики точки (или системы материальных точек), где все ур-ния вытекают из 2-го закона Ньютона, критерий подобия является число Ньютона  $Ne = F l^2 / m l$  и условие М. состоит в том, что

$$Ne_M = Ne_m, \text{ т. е. } \frac{F_M l_M^2}{m_M l_M} = \frac{F_m l_m^2}{m_m l_m}. \quad (1)$$

Для колебаний груза под действием силы упругости  $F = cl$  и равенство (1) приводит к условию  $l_M^2 c_M / m_M = l_m^2 c_m / m_m$ , что, напр., позволяет по периоду колебаний модели определить период колебаний натурн; при этом явление не зависит от линейного масштаба (от амплитуды колебаний). Для движения в поле тяготения, где  $F = \chi m / l^2$ , условием подобия является  $\chi_M^2 l_M^3 / m_M = \chi_m^2 l_m^3 / m_m$  (явление не зависит от масс). При

движении в одном и том же поле тяготения, напр. Солнца,  $\chi_M = \chi_m$  и получившее соотношение даёт 3-й закон Кеплера для периода обращения. Отсюда, считая одну из планет «моделью», можно, напр., найти период обращения любой др. планеты, зная её расстояние от Солнца.

Применение методов М. требует определ. уровня развития соответствующего раздела физики — установления критериев подобия и основных количеств. закономерностей, характеризующих рассматриваемое явление. Это позволяет сформулировать дополнит. условия однозначности измерений, необходимые для реализации М. Кроме того, необходимым условием М. является возможность получения достоверной информации о процессах, происходящих на модели, т. е. соответствующее развитие материальной базы М. — создание эксперим. установок, методики и техники эксперимента, способов измерения и обработки эксперим. данных (см., напр., *Аэродинамический эксперимент*). Напр., при М. трения твёрдых тел необходимо учитывать как механич. сторону процесса (шероховатость, геометрию единичных выступов, их взаимное расположение), так и его молекулярную сторону (физ.-хим. процессы, структурные и фазовые изменения, влияние нагрева на свойства материалов). В этом случае для построения соответствующих критериев используют более 20 параметров.

**М. гидроаэромеханических явлений.** Для непрерывной среды при изучении её движения число критериев подобия также велико, что часто значительно усложняет проблему М. В гидроаэромеханике осн. критериями подобия являются: Рейнольдса число  $Re$ , Маха число  $M$ , Фруда число  $Fr$ , Эйлера число  $Eu$ , а для нестационарных (зависящих от времени) течений ещё и Стружальца число  $Sh$ .

Создаваемые для гидроаэродинамич. М. эксперим. установки и сами модели должны обеспечивать равенство соответствующих критериев подобия у модели и натурн. Обычно это удаётся сделать в случаях, когда для течения в силу его особенностей сохраняется лишь один критерий подобия. Так, при М. стационарного течения несжимаемой вязкой жидкости (газа) определяющим будет параметр  $Re$  и необходимо выполнить одно условие:

$$Re_M = Re_n, \text{ т. е. } \frac{\rho_n v_n l_n}{\mu_n} = \frac{\rho_M v_M l_M}{\mu_M}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность,  $\mu$  — динамич. коэф. вязкости среды. При уменьшенной модели ( $l_M < l_n$ ) это можно сделать, или увеличивая скорость ( $v_M > v_n$ ), или используя для моделирования другую жидкость, у  $k$ -рой, напр.,  $\rho_M > \rho_n$ , а  $\mu_M \leq \mu_n$ . При аэродинамич. исследованиях увеличивать  $v_M$  в этом случае нельзя (нарушается условие несжимаемости), но можно увеличить  $\rho_M$ , используя *аэродинамические трубы* закрытого типа, в  $k$ -рых циркулирует сжатый воздух.

Когда при М. необходимо обеспечить равенство всех критериев, возникают значит. трудности, часто непреодолимые, если только не делать модель тождественной натуре, что фактически означает переход от М. к натурным испытаниям. Поэтому на практике нередко прибегают к приближённому М., при  $k$ -ром часть процессов, играющих второстепенную роль, или совсем не моделируются, или моделируются приближённно. Такое М. не позволяет найти прямым пересчётом значения тех характеристик,  $k$ -рые не отвечают условиям подобия, и их определение требует соответствующих дополнит. исследований. Напр., при М. установившихся течений вязких сжимаемых газов необходимо обеспечить равенство критериев  $Re$  и  $M$  и безразмерного числа  $\gamma = c_p / c_v$  (где  $c_p$  и  $c_v$  — уд. теплотёмкости газа при пост. давлении и пост. объёме соответственно), что в общем случае сделать невозможно. Поэтому как правило, обеспечивают для модели и натурн лишь равенство чисел  $M$ , а влияние на определяемые параметры различий

в числах  $Re$  и  $\gamma$  исследуют отдельно или теоретически, или с помощью др. экспериментов, меняя в них в достаточной широкой пределах значения  $Re$  и  $\gamma$ .

**Механических свойств конструкций и сооружений.** Для твёрдых деформируемых тел особенности  $M$  зависят от свойств этих тел и характера рассматриваемых задач. Так, при моделировании равновесия однородных упругих систем (конструкций), механич. свойства к-рых определяются модулем упругости  $E$  (модулем Юнга) и безразмерным коэффициентом Пуассона  $\nu$ , должны выполняться 3 условия подобия:

$$\nu_M = \nu_m, \quad \frac{\sigma_{гн} l_{гн}}{E_{гн}} = \frac{\sigma_m l_m}{E_m}, \quad \frac{F_M}{E_M l_M^2} = \frac{F_m}{E_m l_m^2}, \quad (3)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести. В естестве условиях  $g_M = g_m = g$  и получить полное подобие при  $l_M \neq l_m$  можно, лишь подобрав для модели спец. материал, у к-рого  $F_M, E_M$  и  $\nu_M$  будут удовлетворять первым двум из условий (3), что практически обычно несущественно.

В большинстве случаев модель изготавливается из того же материала, что и натура. Тогда  $F_M = F_m, E_M = E_m$  и второе условие даёт  $g_{гн} l_{гн} = g_m l_m$ . Когда весовые нагрузки существенны, для выполнения этого условия прибегают к т. н. центробежному моделированию, т. е. помещают модель в центробежную машину, где искусственно создается приближённое однородное силовое поле, позволяющее получить  $g_M > g_m$  и сделать  $l_M < l_m$ . Если же основными являются др. нагрузки, а весом конструкции и, следовательно, учётом её уд. веса  $\gamma = \rho g$  можно пренебречь, то приближённое  $M$  осуществляют при  $g_M = g_m = g$ , удовлетворяя лишь последнему из соотношений (3), к-рое даёт  $F_M/l_M^2 = F_m/l_m^2$ ; следовательно, нагрузки на модель должны быть пропорц. квадрату её линейных размеров. Тогда модель будет подобна натуре, и если, напр., модель разрушается при нагрузке  $F_{кр}$ , то натура разрушается при нагрузке  $F_{кр} l_M^2/l_m^2$ . Если же в этом случае весовые нагрузки не учитывать, поскольку эти нагрузки имеют значения  $\gamma^3$ , а последнее из условий (3) требует пропорциональности нагрузок  $F$ , то при  $l_M < l_m$  весовая нагрузка на модель будет меньше требуемой этим условием, т. е.  $M$  не будет полным и модель, как недогруженная, будет прочнее натуре. Это обстоятельство тоже можно учесть или теоретич. расчётом, или дополнив экспериментами.

Одним из видов  $M$ , применяемым к твёрдым деформируемым телам, является *поляризационно-оптический метод* исследования напряжений, основанный на свойствах ряда изотропных прозрачных материалов становиться под действием нагрузок (т. е. при деформации) анизотропными, что позволяет исследовать распределение напряжений в разл. деталях с помощью их моделей из прозрачных материалов.

При  $M$  явлений в др. непроницаемых средах соответственно изменяется вид и число критериев подобия. Так, для пластичных и вязкопластичных сред в число этих критериев наряду с параметрами Фруда, Струхала и модифициров. параметром Рейнольдса входят параметры Лагранжа, Стокса, Сен-Венана и т. д.

**М. тепловых процессов.** При изучении процессов теплообмена широко используют  $M$ . Для случая переноса теплоты конвекцией определяющими критериями подобия являются *Числовая группа*  $Nu = \alpha l/\lambda$ , *Прайдтль*  $Pr = \nu/\alpha$ , *Грасхоф*  $Gr = \beta g l^3 \Delta T/\nu^2$ , а также число Рейнольдса  $Re$ , где  $\alpha$  — коэф. теплоотдачи,  $\nu$  — коэф. температуропроводности,  $\lambda$  — коэф. теплопроводности среды (жидкости, газа),  $\nu$  — кинематич. коэф. вязкости,  $\beta$  — коэф. объёмного расширения,  $\Delta T$  — разность темп-р поверхности тела и среды. Обычно целью  $M$  является определение коэф. теплоотдачи, входящего в критерий  $Nu$ , для чего опытами на моделях устанавливают зависимость  $Nu$  от др. кри-

териев. При этом в случае вынужденной конвекции (напр., теплообмен при движении жидкости в трубе) становится несущественным критерий  $Gr$ , а в случае свободной конвекции (теплообмен между телом и покоящейся средой) — критерий  $Re$ . Однако к значит. упрощениям процесса  $M$  это не приводит, особенно из-за критерия  $Pr$ , являющегося физ. константой среды, что при выполнении условия  $Pr_M = Pr_m$  практически исключает возможность использования на модели среды, отличной от натурной. Дополнит. трудности вносит и то, что физ. характеристики среды зависят от её темп-ры. Поэтому в большинстве практически важных случаев выполнить все условия подобия не удаётся, приходится прибегать к приближённому  $M$ . При этом от условия равенства критериев, мало влияющих на процесс, отказываются, а др. условия (напр., подобие физ. свойства сред, участвующих в теплообмене) выполняются лишь в среднем. На практике используют часто т. н. метод локального теплового  $M$ , идея к-рого заключается в том, что условия подобия процессов для модели и натуре выполняются только в той области модели, где исследуется процесс теплообмена. Напр., при исследовании теплоотдачи в системе однотипных тел (паров, труб) и теплообмене на модели может участвовать лишь одно тело, на к-ром выполняют измерения, а остальные служат для обеспечения геом. подобия модели и натуре.

В случаях переноса теплоты теплопроводностью (кондуктивной) критериями подобия являются *Фурье число*  $Fo = \alpha t_0/l^2$  и *Био число*  $Bi = \alpha l/\lambda$ , где  $t_0$  — характерный промежуток времени (напр., период), в периодич. процессов (нагревание, охлаждение)  $t_0$  обычно отсутствует и параметр  $Fo$  выпадает, а отношение  $\alpha l/\lambda$  определяет безразмерное время. При  $M$  таких процессов теплообмена удаётся в широких пределах изменить не только размеры модели, но и темп протекания процесса.

При  $M$  радиац. переноса теплоты от разл. высокотемпературных источников (напр., излучения Солнца и планет, струй ракетных двигателей, плазмы) необходимо воспроизводить не только лучистый тепловой поток, но и спектральный состав излучения (см. *Стефан* — *Больцманн закон излучения*, *Планка закон излучения*), что существенно затруднит создание искусств. излучателей для  $M$ .

**Электродинамическое  $M$ .** Электродинамич.  $M$  применяется для исследования эл.-магн. и электромеханич. процессов в электр. системах. Электродинамич. модель представляет собой копию (в определёл. масштабе) натурной электр. системы с сохранением фаз природы основных её элементов. Такими элементами модели являются синхронные генераторы, трансформаторы, линии передач, первичные двигатели (турбины) и нагрузки (потребители электр. энергии), но число их обычно значительно меньше, чем у натурной системы. Поэтому и здесь  $M$  является приближённым, причём на модели на возможности полно представляется лишь исследуемая часть системы.

**Специальные виды  $M$ .** Особый вид  $M$  основан на использовании спец. устройств, сочетающих физ. модели с натурными приборами. К ним относятся испытательные стенды, для испытания машин, наладки приборов и т. п., тренажёры для тренировки персонала, обучающего управлению сложными системами или объектами, имитаторы, используемые для исследования разл. процессов в условиях, отличных от обычных земных, напр. при глубоком вакууме или очень высоких давлениях (в барокамерах), при перегрузках. В таких условиях одновременно воспроизводится комплекс натурных физ. процессов и явлений (напр., процессы теплообмена, воздействия факторов космич. пространства, механич. воздействия улов и агрегатов — вибрации), что позволяет «моделировать» натурные условия функционирования сложных техн. систем (ф и к и о а л и з м е М.).

К функционированию М. близи и установки демонстрац. М., не использующую реальные физ. модели, а представляющие собой модели, лишь наглядно показывающие функционирование техн. устройств или природные физ. явления. Типичной установкой демонстрац. М. является планшетный, демонстрирующий модель Солнечной системы, звёздного неба и др. явления.

Кроме прямого физ. М. при исследовании разл. физ. процессов используются разл. аналогии, позволяющие на основе одностопности матем. ур-ний, описывающих разные физ. процессы, заменить изучение исследуемого процесса изучением др. процесса, к-рый проще осуществить в лаб. условиях. Напр., при М. процессов теплообмена используется электротепловая аналогия, в к-рой исследуемое поле темп-р заменяется полем эллектрич. потенциал в контуре, включающем омич. сопротивление R и ёмкость C, а аналогом коэф. температуропроводности является величина  $1/\rho C$ .

Существуют также аналогия задач о кручении упругого стержня и о вихревом течении идеальной жидкости, электрогидродинамики, аналогия между задачами гидродинамики и электротехники и др., но эти аналогии сравнительно редко применяются при М.

**Приложения** М. Моделирование находит многочисл. приложения как при научных исследованиях, так и при решении большого числа практич. задач в разл. областях техники. Им широко пользуются в строит. деле (определение упругих напряжений, эксплуат. разрушений, частот и форм свободных колебаний, виброзащита и сейсмостойкости разл. конструкций и др.), в гидравлике и гидротехнике (определение конструктивных и эксплуат. характеристик разл. гидротехн. сооружений, условий фильтрации в грунтах, М. течений рек, волн, приливов и отливов и др.), в авиации, ракетной и космич. технике (определение характеристик летат. аппаратов и их двигателей, силового и теплового воздействия среды и др.), в судостроении (определение гидродинамич. характеристик корпуса, рулей и судовых двигателей, ходовых качеств, условий спуска и др.), в приборостроении, в разл. областях машиностроения, включая энергомашиностроение и наземный транспорт, в нефте- и газодобыче, в тепло-технике при конструировании и эксплуатации разл. тепловых аппаратов, в электротехнике при исследовании всевозможных эллектрич. систем и т. п.

Лит.: К и р и ч е в М. В., М и х а е в М. А., Моделирование тепловых устройств, М.—Л. 1938; С е л о в Л. И., Методы подобия и размерности в механике, 10 изд., М., 1987; З я г и с о н Л. С., Моделирование, М., 1952; Ш н е й д е р П. Д. и др., Инженерные проблемы теплопроводности, пер. с англ., М., 1980; Г у х м а н А. А., Введение в теорию подобия, М., 1963; В е п и к о в А. В., Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики, М., 1986.

С. Л. Вишневский, С. М. Тарг.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВЁЗД** — методы нахождения распределений физ. характеристик звёздного вещества (давления, плотности, темп-ры, массы, хим. состава) от центра до поверхности звезды и изменений этих характеристик со временем. Построение моделей даёт возможность установить связь между осн. параметрами звёзд (массой, хим. составом, возрастом) и главными наблюдаемыми характеристиками — *сетчатостью* (интегральным потоком излучения), *эффективной температурой* и ускорением силы тяжести на поверхности. Прослеживая изменения моделируемых параметров звёзд со временем, удаётся описать переменность звёзд и их эволюцию. М. з. основывается на законах гидродинамики, теории переноса излучения, ядерной физике, статистической физике и др. Одним из основных методов исследования является численное моделирование.

Звёзды представляют собой самогравитирующие плазменные тела, состояние к-рых и устойчивость определяются законами гидродинамики сплошных сред. Поскольку звёзды излучают и могут обмениваться веществом с внеш. средой, они не являются термодинамически изолированными системами.

Основы М. з. были заложены в работах Дж. Лейна (J. H. Lane, 1889—70), А. Риттера (A. Ritter, 1878—83) и Р. Эмдена (R. Emden, 1907), развивших теорию адиабатич. политропных моделей звёзд — гидростатически равновесных гауовых конфигураций, в к-рых давление  $p$  и плотность  $\rho$  связаны соотношением  $p = K\rho^{(n+1)/n}$ , где коэф. K и  $n$  (показатель политропы) не зависят от пространств. координат. При условии задания  $n$  можно определить ход физ. характеристик звезды от центра до поверхности, исходя лишь из условия гидростатич. равновесия, без знания конкретного источника энерговыделения, *уравнения состояния* и *непрозрачности* звёздного вещества.

К сер. 20-х гг. 20 в., в значит. степени трудами А. Эддингтона (A. S. Eddington), были сформулированы осн. физ. принципы, на к-рые опирается совр. теория строения звёзд, и высказано предположение, что осн. источником энерговыделения в звёздах являются *термоядерные реакции*, приводящие к превращению элементов. В кон. 30-х гг. К. Вайдцекер (С. F. Weizsäcker) и Х. Бете (H. A. Bethe) показали, что в недрах звёзд должны осуществляться реакции превращения водорода в гелий в протон-протонной цепочке (см. *Водородный цикл*) и в *углеродно-азотном цикле*, а затем Х. Бете, Г. А. Гамов (G. Gamow) и Э. Теллер (E. Teller) вычислили скорости соответствующих реакций. В то же время, в осн. благодаря Р. Фаулеру (R. H. Fowler) и С. Чандрасекхру (S. Chandrasekhar), были построены модели *белых карликов*, состоящих из вырожденного вещества. С 40-х гг., когда ядерный источник энерговыделения был введён в расчёты, по существу начался совр. период М. з.

В наб. обём случае для описания строения и эволюции звёзд необходимо решать величинуую краевую задачу с нач. условиями для системы ур-ний в частных производных, в к-рой независимыми переменными являются пространств. координаты и время. Ур-ния звёздной гидродинамики (без учёта магн. поля) включают:

- а) ур-ние неразрывности, постулирующее сохранение массы звёздного вещества:
 
$$\partial\rho/\partial t + \nabla(\rho v) = 0;$$
- б) закон сохранения импульса, описывающий изменение импульса каждого элемента вещества:
 
$$\rho(dv/dt) + \nabla p + \rho v \Phi = 0;$$
- в) ур-ние Пуассона для гравитач. потенциала  $\Phi$ :
 
$$\Delta\Phi = 4\pi G\rho = 0;$$
- г) закон сохранения энергии, к-рый описывает тепловое равновесие звезды с учётом энерговыделения:
 
$$\rho(du/dt) + p(\nabla v) + \nabla F - \rho \epsilon = 0;$$
- д) ур-ние, выражающее связь потока энергии с gradientом темп-ры (закон Фика):
 
$$F + k\nabla T = 0.$$

В зонах адиабатич. *конвекции* оба последних ур-ния заменяются условием изэнтропичности ( $dS/dr = 0$ ). При пост. показателе адиабаты этот случай описывается теорией Лейна — Риттера — Эмдена.

В приведённых ур-ниях:  $\rho$  — плотность,  $v$  — скорость,  $u$  — уд. внутр. энергия,  $F$  — поток энергии,  $T$  — темп-ра,  $\epsilon$  — скорость энерговыделения,  $k$  — коэф. теплопроводности,  $S$  — энтропия,  $t$  — время. Записанная система ур-ний дополняется ур-нием состояния вещества, описывающим зависимость давления от плотности, темп-ры и хим. состава звезды, а также выражениями для скорости генерации ядерной энергии и коэф. теплопроводности, к-рый выражается чере непрозрачность недр звёзд (поглощение излучения веществом). При исследовании эволюции звёзд добавляются ур-ния для вычисления изменений со временем

хим. состава звёзд (с учётом ядерных реакций и возможного перемешивания звёздного вещества). В случае предельно быстрого перемешивания вещества (по сравнению с характерным временем эволюции) изменения химического состава локально описываются ур-ниями типа:

$$\left. \begin{aligned} dX_k/dt &= P_k - Q_k - \text{в зонах с лучистым равновесием,} \\ \frac{dX_k}{dt} &= \frac{1}{\Delta \Omega_k} \int (P_k - Q_k) d\Omega_k - \text{в конвективных зонах,} \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $X_k$  — обилие  $k$ -го элемента,  $P_k$  и  $Q_k$  — скорости его рождения и разрушения в ядерных реакциях,  $\Delta \Omega_k$  — масса конвективной зоны (см. *Звёзды*).

Строение подавляющего большинства звёзд вполне удовлетворительно воспроизводит стационарные сферически симметричные модели. В этом случае после введения, напр., лагранжевой координаты  $\Omega_r$ , равной массе, заключённой в сфере радиуса  $r$ :  $\Omega_r = \int_0^r 4\pi r^2 \rho dr$ , строение звезды (в предельном случае очень медленного изменения её параметров) описывается системой обыкновенных дифференц. ур-ний:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\rho}{d\Omega_r} &= -\frac{G}{4\pi} \frac{\Omega_r}{r^2} - \text{ур-ние гидростатич. равновесия,} \\ \frac{d\rho}{d\Omega_r} &= \frac{1}{4\pi r^2} - \text{ур-ние сохранения масс,} \\ \frac{dT}{d\Omega_r} &= -\frac{3\kappa}{64\pi c T^3} \frac{L_r}{\pi r^2} - \text{в слоях с лучистым переносом энергии} \\ \text{или} \\ \frac{dT}{d\Omega_r} &= \frac{\Gamma - 1}{\Gamma} \frac{T}{\rho} \frac{d\rho}{d\Omega_r} - \text{в слоях с конвективным переносом энергии,} \\ dL_r/d\Omega_r &= \varepsilon - \text{ур-ние теплового баланса.} \end{aligned} \right\} (2)$$

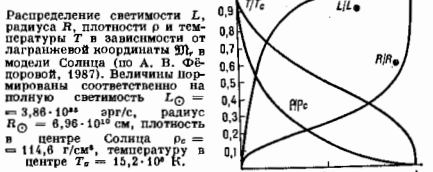
Здесь:  $r$  — радиус,  $\kappa$  — непрозрачность,  $a$  — постоянная плотности излучения,  $L_r$  — светимость,  $\Gamma$  — показатель адиабаты.

Диапазон изменений темп-р и плотностей в недрах звёзд велик и составляет по темп-ре 6–7 порядков величины, а по плотности до 18–20 порядков. Поэтому во мн. случаях эти переменные амеинуют их логарифмич.  $\Phi$ -цинии.

Записанная выше система ур-ний решается конечно-разностными методами. Звезда разбивается на определённое число счётных интервалов, на каждом из  $k$ -рых дифференц. ур-ния заменяются разностными, и затем решается система нелинейных алгебраич. ур-ний. Число интервалов зависит от эволюц. стадии, на  $k$ -рой находится звезда, необходимой точности расчётов и ресурсов машинного времени. Напр., для звёзд гл. последовательности (см. *Герцирлунга — Рессела диаграмма*), имеющих сравнительно простую структуру, обычно достаточно 30–40 интервалов; для красных сверхгигантов с двойным словесым источником энерговыделения обычно рассматривают неск. сотен интервалов. В наиб. распространённом численном методе Л. Хельи (L. Helgeu) система разностных нелинейных алгебраич. ур-ний для фиксиров. момента времени  $t^n$  решается итерационным методом Ньютона — Рунсона до достижения заданной точности. Затем определяются изменения хим. состава на временном интервале  $\Delta t = t^n - t^{n-1}$  в качестве нач. приближения для нового цикла итераций. Зависимые переменные экстраполируются к моменту  $t^{n+1}$ , и снова решаются система ур-ний по  $\Omega_r$ . Таким образом выделяются эволюц. последовательности моделей звёзд,  $k$ -рые в принципе позволяют проследить развитие звёзд от образования до разрушения или превращения в холодные объекты. Обычно предполагается, что при данной массе и хим.

составе система (2) имеет единств. решение, но это, вообще говоря, строго не доказано.

Ур-ния, описывающие строение звёзд, имеют особенности:  $\rho \approx 0$ ,  $T = 0$  при  $\Omega_r = \Omega$  и  $r = L_r = 0$  при  $\Omega_r = 0$ , где  $\Omega$  — полная масса звезды. Поэтому граничные условия для систем (2) в центре могут быть найдены аналитич. интегрированием (2) в малой окрестности центра при  $\Omega_r = \Omega$  по наст. пробным  $T$  и  $\rho$ . Граничные условия при  $\Omega_r = 0$  находят, определяя поверхность звезды как уровень, на  $k$ -ром темп-ра равна афф. темп-ре  $T_0$  звезды, и исходя из того, что слои, расположенные над поверхностью, должны иметь конечную *оптическую толщину*  $\tau_0$  (напр., из теории переноса излучения следует, что в случае плоской атмосферы  $\tau_0 \approx 2/3$ ).



Распределение светимости  $L_r$ , радиуса  $R$ , плотности  $\rho$  и температуры  $T$  в зависимости от лагранжевой координаты  $\Omega_r$  в модели Солнца (по А. В. Фёдоровой, 1987). Величины нормированы соответственно на полную светимость  $L_\odot = 3,86 \cdot 10^{33}$  эрг/с, радиус  $R_\odot = 6,96 \cdot 10^{10}$  см, плотность в центре Солнца  $\rho_c = 114,6$  г/см<sup>3</sup>, температура в центре  $T_c = 15,2 \cdot 10^7$  К.

Форма аппроксимации ур-ния состояния звёздного вещества,  $k$ -рое используется при М. з., зависит от полной массы звезды, стадии её эволюции и положения рассматриваемой точки относительно центра звезды. В недрах звёзд с массой  $1 \leq \Omega_r/M_\odot \leq 10$  на стадии термоядерного горения водорода, на  $k$ -рой они производят  $\approx 90\%$  времени своей жизни, основная компонента плазмы представляет собой идеальный газ и для него выполняется *Бойля — Мариотта закон*. Для более массивных звёзд необходимо учитывать давление и уд. энергию излучения. Отклонения газа от идеальности, связанные в первую очередь с кулоновским взаимодействием, существенно влияют на ур-ние состояния при  $\Omega_r < \Omega_\odot$ . На стадиях эволюции, следующих за термоядерным «выгоранием» водорода, т. е. при высоких  $T$  и  $\rho$ , кроме отклонений от идеальности необходимо учитывать вырожденное электронное газ, давление  $k$ -рого намного превосходит давление газа ионов. Во внешних, относительно холодных слоях звёзд ( $T \sim 10^4 - 10^6$  К) возможны неполная ионизация вещества, образование молекул и пыли. На наиб. поздних стадиях эволюции, когда вещество сильно уплотнено, возникает необходимость учитывать эффекты общей теории относительности.

Непрозрачность звёздного вещества  $\kappa$  устанавливает соотношение между полным потоком переносимой излучением энергии и градиентом темп-ры слоев, через  $k$ -рые излучение проходит. Величина  $\kappa$  является  $\Phi$ -цией темп-ры, плотности, хим. состава вещества. Осн. слагаемые непрозрачности звёздного вещества — фотоэффект, тормозные процессы, комптоновское рассеяние, поглощение в линиях, поглощение излучения молекулами и пылью. Для переноса энергии в вырожденном электронном газе существ. роль играет теплопроводность электронов. Вычисление  $\kappa$  представляет собой самостоят. сложную задачу квантовой механики, и существующие в литературе данные о непрозрачности постоянно уточняются. Поскольку простые аналитич.  $\Phi$ -ламы описать изменения  $\kappa$  во всем интервале темп-р и плотностей звёздных недр, как правило, невозможно, то при совр. М. з. на ЭВМ в наиб. точных расчётах значения  $\kappa$ , так же как и значения термодинамич. характеристик вещества, задаются в табличном виде.

Потери энергии звезд на излучение компенсируются ядерным энерговыделением. Эволюция звезд может быть охарактеризована как смена источников энерговыделения. Звезды могут проходить стадии термоядерного горения водорода, гелия, углерода, кислорода, неона и т. д. до образования ядер из смеси изотопов Fe и Ni. Если конкретная задача М. з. требует знания детального хим. состава, то на каждом интервале времени решаются системы ур-ний типа (1), учитывающие десятки изотопов и ядерных реакций. При расчёте эволюции звезд в энерговыделении необходимо учесть изменение внутр. энергии со временем и работу сил давления (т. е. гравитационное энерговыделение  $\epsilon_g$ ):

$$\epsilon_g = -P \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\sigma} \right) - \frac{d\sigma}{dt}.$$

На поздних стадиях эволюции, при  $T \approx 10^8$  К, важную роль начинают играть потери энергии, связанные с генерацией нейтрино в фотонейтринном процессе, при аннигиляции пар  $e^+e^-$ , распаде плазмонов.

Среди др. процессов, к-рые рассматриваются при М. з., — конвективный перенос энергии (адиабатический и неадиабатический), изменение массы звезд из-за звездного ветра и (или) при обмене веществом в тесных двойных системах.

Пусть М. з. удаётся воспроизвести осн. параметры б. ч. наблюдаемых звезд, оценить численность звезд с разл. характеристиками, сконструировать эволюц. сценарии, связывающие между собой наблюдаемые объекты разных классов. Наиб. важным и принципиальным результатом, достигнутым на основании М. з., следует считать объяснение особенностей диаграммы Герцшпрунга — Рассела для звездных скоплений. Совр. результаты моделирования самой изученной звезды — Солнца приведены на рисунке.

Хотя для объяснения характеристик большинства звезд вполне достаточно стационарных сферически-симметричных моделей, есть ряд проблем, для решения к-рых этого приближения недостаточно; напр., эволюция прото звезд, взрывные процессы на звездах, вращение и пульсации звезд. В этих случаях решаются системы гидродинамич. ур-ний в одномерном или двух- и трёхмерном приближениях с учётом переноса энергии. Следует, однако, отметить, что неоднородные расчёты стационарных процессов находятся (1988) на грани возможностей ЭВМ.

Лит.: Внутреннее строение звезд, под ред. Л. Аллера, Д. В. Мак-Лафлина, пер. с англ., М., 1970; Зельдович Я. В., Бл и н и к о в С. И., Ш а н у р а Н. И., Физические основы строения и эволюции звезд, М., 1981; Т а с с у л ь К. Л., Теория вращающихся звезд, пер. с англ., М., 1982; К о с Д. П., Теория звездных пульсаций, пер. с англ., М., 1971; В и с н о в а т а Я-Р о г а н Г. С., Физические вопросы теории эволюции, М., 1989. Л. Р. Дьячелсон.

**МОДУЛИ УПРУГОСТИ** — величины, характеризующие упругие свойства материала. В случае малых деформаций упругого тела связь между компонентами напряжения  $\epsilon_{11}$ ,  $\epsilon_{22}$ , ...,  $\epsilon_{33}$  и компонентами относит. деформации  $\epsilon_{11}$ ,  $\epsilon_{22}$ , ...,  $\epsilon_{33}$  в век-рной точке тела представляется шестью линейными соотношениями (см. Гук закон):

$$\sigma_{11} = \epsilon_{11}E_{11} + \epsilon_{12}E_{23} + \epsilon_{13}E_{33} + \epsilon_{14}E_{12} + \epsilon_{15}E_{23} + \epsilon_{16}E_{31},$$

$$\sigma_{22} = \epsilon_{21}E_{11} + \epsilon_{22}E_{22} + \epsilon_{23}E_{33} + \epsilon_{24}E_{12} + \epsilon_{25}E_{23} + \epsilon_{26}E_{31},$$

$$\sigma_{33} = \epsilon_{31}E_{11} + \epsilon_{32}E_{22} + \epsilon_{33}E_{33} + \epsilon_{34}E_{12} + \epsilon_{35}E_{23} + \epsilon_{36}E_{31},$$

$$\sigma_{12} = \epsilon_{12}E_{12} + \epsilon_{13}E_{23} + \epsilon_{14}E_{11} + \epsilon_{15}E_{22} + \epsilon_{16}E_{33},$$

$$\sigma_{23} = \epsilon_{23}E_{23} + \epsilon_{24}E_{12} + \epsilon_{25}E_{11} + \epsilon_{26}E_{22} + \epsilon_{27}E_{33},$$

$$\sigma_{31} = \epsilon_{31}E_{11} + \epsilon_{32}E_{22} + \epsilon_{33}E_{33} + \epsilon_{34}E_{12} + \epsilon_{35}E_{23} + \epsilon_{36}E_{31},$$

Коэф.  $\epsilon_{11}$ ,  $\epsilon_{12}$ , ...,  $\epsilon_{66}$  наз. М. у. и имеют размерность напряжения, т. е. единицы силы, отнесённой к единице площади, поскольку  $\epsilon_{ij}$  — безразмерные величины. Физ. смысл М. у. выявляется при рассмотрении осн. элементарных типов напряжённого состояния упругого тела: одностороннего нормального напряжения, чистого сдвига и всестороннего нормального напряжения. Для каждого из этих напряжённых состояний зависимость между напряжением и соответствующей ему

деформацией определяется простейшей ф-лой: напряжение равно произведению соответствующей деформации на М. у. Одностороннему нормальному напряжению  $\sigma$ , возникающему при простом растяжении (сжатии), соответствует в направлении растяжения  $n$  модуль продольной упругости  $E$  (модуль Юнга). Он равен отношению нормального напряжения к относит. удлинению, вызванному этим напряжением в направлении его действия:  $E = \sigma/\epsilon$  и характеризует способность материалов сопротивляться деформации растяжения.

Напряжённое состояние чистого сдвига, при к-ром по двум взаимно ортогональным площадкам действуют только касат. напряжения  $\tau$ , соответствует  $n$  модуль сдвига  $G$ . По величине он равен отношению касат. напряжения  $\tau$  к величине угла сдвига  $\gamma$ , определяющего искажение прямого угла между плоскостями, по к-рым действуют касат. напряжения:  $G = \tau/\gamma$  и представляет способность материала сопротивляться изменению формы при сохранении его объёма.

Всестороннему равному нормальному напряжению  $\sigma$ , возникающему при гидростатич. давлении, соответствует  $n$  модуль объёмного сжатия  $K$  (объёмный М. у.). Он равен отношению величин нормального напряжения к величине относит. объёмного сжатия, вызванного этим напряжением:  $K = \sigma/\theta$  (где  $\theta = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$  — относит. изменение объёма) и характеризует способность материала сопротивляться изменению его объёма, не сопровождающемуся изменением формы.

К пост. величинам, характеризующим упругие свойства материала, относится коэф. Пуассона  $\nu$ . Величина его равна отношению абс. значения относит. поперечного сжатия сечения  $\epsilon'$  (при одностороннем растяжении) к относит. продольному удлинению  $\epsilon$ , то есть  $\nu = |\epsilon'|/\epsilon$ . Величины М. у. и коэф. Пуассона для нек-рых материалов приведены в табл. 1. Для однородного изотропного тела, напр. мелкозернистого металла, поликристалла с беспорядочной ориентировкой зёрен (т. е. не имеющего текстуры), М. у. и коэф. Пуассона одинаковы по всем направлениям. Величины  $E$ ,  $G$ ,  $K$  и  $\nu$  связаны соотношениями:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}.$$

Следовательно, только две из них являются независимыми величинами и упругие свойства в случае изотропного тела определяются двумя упругими постоянными.

Табл. 1.

Наименование материала	$E \cdot 10^{-2}$ , МН/м <sup>2</sup>	$G \cdot 10^{-2}$ , МН/м <sup>2</sup>	$K \cdot 10^{-3}$ , МН/м <sup>2</sup>	$\nu$
Алюминий . . . . .	71,9	27,2	74,6	0,24
Маягний . . . . .	45,2	17,7	33,9	0,28
Медь . . . . .	125	46,4	142	0,34
Латушь (70% Cu, 30% Zn)	100,6	37,3	111,8	0,35
Железо (отожжённое)	211,4	81,6	169,8	0,29
Сталь низкоуглеродистая	211,9	82,2	169,2	0,29
Сталь отожжённая (0,75%)	210,0	81,1	168,7	0,29
Сталь закалённая . . . . .	201,4	77,8	165,0	0,29
Молибден . . . . .	324,8	125,6	261,2	0,29
Пник . . . . .	104,5	41,9	89,4	0,25
Стекло . . . . .	56	22	18,7	0,2
Гранит . . . . .	49	—	—	—
Каучук . . . . .	0,08	—	—	0,47

В случае анизотропного материала, напр. монокристаллов,  $E$ ,  $G$  и  $\nu$  принимают разные значения в разл. кристаллографич. направлениях и их величины могут изменяться в широких пределах. Для монокристаллов М. у. для разных направлений иногда паз. постоянными упругости. Величины М. у. для нек-рых металлич. монокристаллов приведены в табл. 2.

Табл. 2.

Металл	$E_{111} \cdot 10^{-11}$ ЭД/ММ <sup>2</sup>	$E_{112} \cdot 10^{-11}$ ЭД/ММ <sup>2</sup>	$G_{111} \cdot 10^{-11}$ ЭД/ММ <sup>2</sup>
Al	84,1	77,4	729,0
Ca	132,8	221,0	76,5
Fe	132,8	227,7	113,3
Pb	11,0	39,6	14,75
W	400	400	155

Примечания:  $E_{111}$  —  $M$  у в направлении среза куба элементарной кристаллической ячейки,  $E_{112}$  —  $M$  у в направлении пространств диагонали куба.

зависимых упругих постоянных сводится к двум.

$M$  у устанавливаются экспериментально при статич. или динамич. испытаниях. В первом случае образец подвергается воздействию усилий, вызывающих в нём определ. напряжённое состояние. Напр.,  $E$  обычно определяют при испытываемых образцах на растяжение,  $G$  — на кручение и  $K$  — на всестороннее сжатие. Величины соответствующих  $M$  у устанавливаются измерением приложенных усилий и возникающих при этом деформаций. При динамич. измерениях  $M$  у используют зависимость между частотой колебаний образца и величиной  $M$  у. В случае продольных колебаний определяются  $E$ , в случае крутящихся колебаний —  $G$ .

$M$  у не являются строго пост. величинами для одного и того же материала, их значения меняются в зависимости от хим. состава и (в меньшей степени) от предварительной термич. и механ. обработки материала. Границы изменения  $M$  у, обычно указываются в справочниках. В пределах упругих деформаций величина  $M$  у не зависит от скорости деформации. С изменением темп-ры материала значения  $M$  у также меняются. Зависимость  $M$  у от темп-ры близка к линейной. В ср. уменьшение  $M$  у при повышении темп-ры на 100° соответствует 2—4%.

Лит.: Лангау Д. Д., Лифшиц Е. М., Теория упругости, 4 изд., М., 1987; Ли и Шен Б. Т., Крайонши В. С., Ли и Чен И. Л., Физические свойства металлов и сплавов, 2 изд., М., 1980; Солтовова С. И., В. С., Механические свойства металлов, 2 изд., М., 1983; Нойк А. Б., Релаксационные явления в кристаллах, пер. с англ., М., 1975.

**МОДУЛИРОВАННЫЕ КОЛЕБАНИЯ** — колебания, параметры  $k$ -рых (амплитуда, фаза, частота, длительность и т. п.) изменяются во времени. Это понятие распространяется и на колебания, параметры  $k$ -рых изменяются в пространстве, тогда говорят о пространственно-модулированных колебаниях; в отличие от временных  $M$  к. они могут быть дву- и трёхмерными. Далее всюду речь идёт только о колебаниях, модулированных во времени. Характер исходных (несущих) колебаний и законы их модуляции разнообразны: от простейших гармонических до хаотических. Это могут быть даже не колебательные, а, напр., импульсные сигналы с переменными длительностью, связанными или другими характеристиками для импульсной модуляции параметрами.

Простейшим примером  $M$  к., имеющим принципиальное значение для описания мн. физ. процессов и техн. приложений, является квазигармонич.  $M$  к.:

$$u(t) = a(t)\cos\psi(t) = a(t)\cos[\omega_0 t + \psi(t)], \quad (4)$$

где  $a(t)$  — мгновенная амплитуда,  $\psi(t)$  — полная фаза колебаний,  $\omega_0 = \text{const}$  — несущая частота,  $\psi(t)$  — фаза колебаний. Все эти величины вводят по аналогии с обычными гармонич. колебаниями, для  $k$ -рых  $a(t) = \text{const}$  и  $\psi(t) = \text{const}$ . В произвольном случае представление (4) неоднозначно: множеству пар  $a(t)$ ,  $\psi(t)$  соответствует одна и та же ф-ца  $u(t)$ , что затрудняет строгий анализ  $M$  к. Обычно эту неоднозначность удаётся устранить и оперировать с амплитудами и фазами

как с определ. параметрами  $M$  к. В частности, одним из априорич. способов устранения неоднозначности является введение дополнит. сигнала  $v(t)$ , каждая фурье-составляющая  $k$ -рого сдвигута по фазе на  $\pi/2$  относительно соответствующей фурье-составляющей осн. сигнала  $u(t)$  (преобразование Гильберта), что приводит к образованию т. н. аналитического сигнала:

$$w(t) = u(t) + iv(t) = a(t)\exp i\psi(t), \quad (2)$$

амплитуда  $a(t)$  и фаза  $\psi(t)$   $k$ -рого однозначно выражаются через  $u(t)$  и  $v(t)$ :

$$a(t) = [u^2(t) + v^2(t)]^{1/2}, \\ \psi(t) = \arctg[v(t)/u(t)].$$

Физически это соответствие мысленной замене осцилляторов ротаторами. Во мн. техн. устройствах, реализующих, напр., приём  $M$  к., преобразование (2) используют как наиболее эфф. средство демодуляции.

Интерпретации  $M$  к. как в исходной (1), так и в обобщённой (2) форме совпадают, если предположить медленно изменяющуюся ф-цу  $a(t)$  и  $\psi(t)$  на протяжении периода  $T$  несущей частоты  $\omega_0 = 2\pi/T$  и пренебречь усреднённым вкладом высших составляющих спектра. Как правило, именно с таким квазигармонич.  $M$  к. приходится иметь дело в технике.

Виды  $M$  к. Итак, в определ. условиях [мелнотность изменения и (или) возможность доупределения]  $M$  к. можно разделить на амплитудно-модулированные колебания (АМК) и фазомодулированные колебания (ФМК). Последние называют иногда также колебаниями с угл. модуляцией, выделяя среди них частотно-модулированные колебания (ЧМК) и собственно ФМК. Тем не менее, поскольку

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t \omega(t) dt + \psi(t), \quad (3)$$

точных критериев различения режимов, в  $k$ -рых  $\omega(t) = \text{const}$ ,  $\psi(t) \neq \text{const}$  и  $\psi(t) = \text{const}$ ,  $\omega(t) \neq \text{const}$ , не существует. Поэтому при проведении такой классификации руководствуются скорее лексич. «сенсориальной интуицией», а главные принципы реализации процессов модуляции и демодуляции в соответствующих техн. устройствах.

Квазигармонич. АМК обычно записывают в виде:

$$u_{\text{АМК}}(t) = a_0[1 + M s(t)]\cos(\omega_0 t + \psi_0). \quad (4)$$

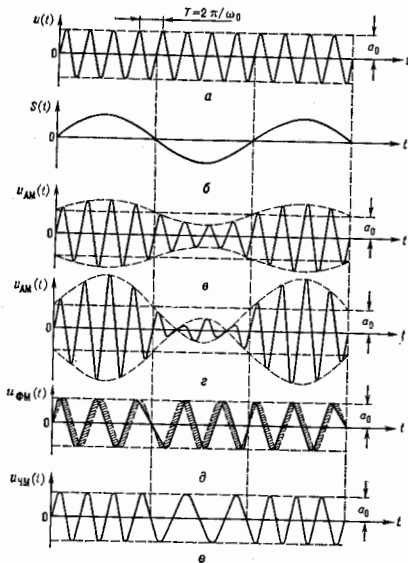
Здесь  $a_0$  — пост. амплитуда несущего колебания (рис., а),  $s(t)$  — нормированный [объём  $\max|s(t)| = 1$ ] модулирующий сигнал (рис., б),  $M$  — коэф. модуляции (см. Амплитудная модуляция). Случай  $M \ll 1$  соответствует слабо-модулированным АМК (рис., в),  $M \approx 1$  — глубокомодулиров. АМК; сигналы с  $M > 1$  наз. перемодулированными (рис., в). При использовании АМК в приёмопередающих системах (вещание, связь и т. п.) выбирают оптимальные (с точки зрения эфф. использования мощности передатчика и наименьших искажений формы АМК) значения  $M$ . Поскольку передаваемая информация равномерно заключена в верхних и нижних боковых составляющих спектра АМК, то выгодно формировать и передавать информацию АМК с подавлением одной из групп боковых частот (полос). В этом случае получаются т. н. однополосные  $M$  к., содержащие комбинацию АМК и ФМК, характерные для систем с частотным уплотнением канала передачи и высокой энергетич. эффективностью. Иногда используют частичное или полное подавление несущей компоненты с последующим её восстановлением в приёмной системе.

Квазигармонич. ФМК и ЧМК записывают в виде, аналогичном (4):

$$u_{\text{ФМК}}(t) = a_0 \cos[\omega_0 t + K_{\text{ФМК}} s(t) + \psi_0], \quad (5)$$

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = a_0 \cos[\omega_0 t + K_{\text{ЧМ}} \int_{-\infty}^t s(\tau) d\tau + \psi_0], \quad (6)$$

где  $K_{\text{ФМ}}$ ,  $K_{\text{ЧМ}}$  — коэф., характеризующие девиацию фазы  $\Delta\phi$  и частоты  $\Delta\omega$  (рис.,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ). В силу соотношения (3) ф-лы (5) и (6) взаимно связаны, что и позволяет считать ЧМК равнозначностью ФМК и наоборот.



Модулированные колебания: а — несущее (немодулированное) колебание; б — гармоническое модулирующее колебание; в — амплитудно-модулированное колебание; г — фазо-модулированное колебание; е — частотно-модулированное колебание.

Спектры ФМК и ЧМК (см. *Частотная модуляция, Фазовая модуляция*) существенно сложнее спектра АМК даже в случае гармонич. модуляции и в значит. мере определяются значением индекса модуляции  $m = \Delta\omega/\Omega$ , характеризующего отношение девиации частоты к частоте  $\Omega$  модулирующего сигнала. При  $m \gg 1$  (а именно такие значения обычно используют в системах связи) ширина спектра ЧМК равна удвоенной девиации частоты  $2\Delta\omega = 2m\Omega$ , тогда как спектр АМК занимает полосу шириной  $2\Omega$ , т. е. в  $m$  раз меньше. Причём для ЧМК девиация частоты пропорц. амплитуде модулирующего сигнала  $\Delta\omega_{\text{ЧМ}}$  и не зависит от частоты  $\Omega$ , а для ФМК, в силу (3),  $\Delta\omega_{\text{ФМ}}$  пропорциональна  $\Omega$ . Большая «широкополосность» ЧМК и ФМК часто (но не всегда, исключение составляют, напр., случаи оптич. приёма) обуславливает их большую помехоустойчивость по сравнению с АМК.

Др. важными видами М. к., встречающимися в технике и природе, являются колебания, модулированные как по амплитуде, так и по фазе (частоте), а также импульсно-модулиров. колебания — последовательности импульсов с ВЧ-заполнением (см. *Импульсная модуляция*).

**Применения М. к.** Фактически все сигналы, используемые в технике и возникающие в естеств. условиях, можно считать М. к. В технике связи, напр., модулирующие сигналы являются информациональными, т. е. содержащими передаваемую информацию, тогда как несущее колебание, частота к-рого, как правило, много больше ширины спектра информац. сигнала, обеспечивает более эфф. передачу этой информации на расстоянии. При этом отбрасывая АМК подвергается случайным изменениям и на трассе распространения, и в приёмопередаточной аппаратуре (т. е. обладает слабой помехоустойчивостью, в особенности в области НЧ), поэтому применение АМК целесообразно там, где важна простота устройств связи и характер сообщения может не пострадать из-за отсутствия или искажения НЧ-компонент спектра. Так, в телевидении для передачи изображения используют односторонние АМК, а для передачи НЧ-спектра звукового сопровождения применяют более помехоустойчивые ЧМК. У ЧМК, однако, более широкий спектр по сравнению с АМК, в особенности когда индекс модуляции выбран большим для ослабления действия помех и повышения точности передачи сообщения, что снижает эффективность использования рабочего диапазона частот при ограниченном числе каналов связи.

В радиолокации и радиостроении М. к. используют для обнаружения целей и определения их координат геом. (размеры, конфигурация) и физ. (температура, плотность, диэлектрич. проницаемость и т. п.) параметров. Для физ. сред характерно влияние естеств. модуляции, возникающей при воздействии магн. или электр. полей на залучающие материальные среды (см. *Зеемана эффект, Штарка эффект*); при рассеянии света на колебаниях кристаллич. решётки твёрдых тел (*Мандельштама — Бриллюэна рассеяние*) и т. д. Понятие естеств. модуляции распространяют также на волны. Так, напр., волновой пучок достаточной интенсивности может изменить параметры среды и, как следствие, модулировать свою плотность (см. *Саморасфокусировка света*). При распространении волн в нелинейных диспергирующих средах (жидкостях, плазме) возникает явление автомодуляции волн, связанное с разл. видами неустойчивости волн по отношению к НЧ-пространственно-временным возмущениям. Естеств. модуляция находит практич. приложение в радио- и оптич. спектроскопии для диагностики параметров разнообразных сред; в нелинейной оптике для формирования мощных световых потоков; в акустике и др. областях прикладной физики. Способы практич. реализации М. к. связаны, как правило, с нелинейными устройствами, параметры к-рых (в радиотехнике, напр., это ёмкость, сопротивление; в акустике — плотность, и т. п.) можно изменять во времени в соответствии с законом модуляции. Техн. устройства, реализующие М. к., наз. модуляторами.

Лит.: Рывин С. М., Модулированные колебания и волны, *Тр. ФИАН*, 1949, т. 2, в. 1; Френкел Л., Теория сигналов, пер. с англ., М., 1974; Вассалао С. И., Радиотехнические цепи и сигналы, М., 1983; Вайштейн Л. А., Вакман Д. Е., Разделение частот в теории колебаний и волн, М., 1983.

Ю. К. Бозартёр, М. А. Миллер.

**МОДУЛИРОВАННЫЕ СТРУКТУРЫ** — твердотельные структуры с естеств. или искусств. модулицией состава. Период М. с. на 1—2 порядка превышает постоянную кристаллической решётки. Естеств. М. с. возникают при изоморфном распаде твёрдых растворов на две новые фазы, отличные по составу. При определ. отношениях упругих постоянных минимуму упругой энергии, связанной с различием постоянных решёток двух изоморфных твёрдых растворов, соответствует чередование тонких пластин, т. е. образование М. с. вместо хаотич. распределения фаз. Образование М. с. приводит к появлению специфических дифракционных эффектов — спателитов рентгеновских линий (см. *Рентгеновский структурный анализ*) и к изменению ряда физ. свойств.

Искусств. М. с. создают путём ориентированного поглощения иррадиация двух полупроводниковых или металлических материалов. Наличие дополнительного одномерного периодич. потенциала существенно меняет энергетич. спектр электронов, что проявляется в оптич., кинетич. и магн. свойствах (см. *Сверхрешётка*).

Лит.: Х а ч а т у р я н А. Г., Теория фазовых превращений и структура твёрдых растворов, М., 1974; Ч у и с т о в К. В., Старшие металлургич. слывов, К., 1985; В. А. Фокева. МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА — устройства для управления параметрами световых потоков (амплитудой, частотой, фазой, поляризацией). Простейшие амплитудные М. с. — механич. прерыватели светового луча, в качестве к-рых используют вращающиеся и колеблющиеся заслонки, призмы, зеркала, а также вращающиеся *расстры*. Однако быстрдействие и надёжность таких М. с. велики. Наиб. широкое практич. применение получили М. с. на основе физ. эффектов, при к-рых внеш. поля меняют оптич. характеристики среды, таких, как электрооптические *Поппельса эффект* и *Керра эффект*, магнитооптический *Фарадея эффект*, *фотоупругость* и сдвиг края полосы поглощения (*Кельдына — Франца эффект*).

Фазовые М. с. на основе эффекта Поппельса используют линейное изменение показателя преломления нецентросимметричных кристаллов в зависимости от величины электр. поля  $E$ , в к-ром находится кристалл:

$$n = n_0 + \frac{1}{2} \pi n_0^3 \gamma E,$$

где  $n_0$  — показатель преломления кристалла в отсутствие внеш. поля,  $\gamma$  — электрооптич. коэф., зависящий от свойств и ориентации кристалла, направления поля  $E$  и поляризации входящего света.

Световой пучок, прошедший путь  $l$  в кристалле, помещённом в электр. поле  $E$ , приобретает фазовый сдвиг:

$$\varphi = 2\pi l n / \lambda = \varphi_0 + \pi n_0^3 \gamma E l / \lambda,$$

где  $\lambda$  — длина волны света в вакууме,  $\varphi_0$  — начальный сдвиг фаз, приобретённый светом при прохождении кристалла в отсутствие поля. Наличие фазового сдвига, вызванного внеш. полем (второй член справа), и означает фазовую модуляцию света. Линейный электрооптич. эффект имеет очень малую инвертируемость и позволяет изменять фазу света за время  $\sim 10^{-12}$  с. Обычно электр. поле  $E$  прикладывается к кристаллу либо в направлении распространения света (продольный эффект), либо в перпендикулярном направлении (поперечный эффект). При продольном эффекте произведение  $E l$  равно внеш. напряжению  $U$ , приложенному к кристаллу. При поперечном эффекте  $U = E h$ , где  $h$  — размер кристаллич. элемента вдоль силовых линий электр. поля. Величину фазовой задержки можно записать в виде:  $\varphi = \varphi_0 + \pi U / U_{\lambda}$ , где  $U_{\lambda} = h \lambda / n_0^3 \gamma$  — т. н. полувольтное напряжение, т. е. т. н. напряжение, к-рое нужно приложить к фазовому М. с. для получения сдвига фаз на угол  $\pi$ . При использовании продольного эффекта ( $h = l$ )  $U_{\lambda}$  зависит только от  $\lambda$  и свойств кристаллич. элемента и составляет величину  $\sim$  неск. кВ; а при поперечном эффекте зависит и от геометрии элемента ( $h/l$ ).

Полувольтное напряжение  $U_{\lambda}$  используется как характеристика М. с. на низких частотах модуляции, где непосредственно измеряемой величиной является напряжение. На высоких частотах сдвиг фаз  $\varphi$  удобнее определять как ф-цию мощности  $P$  управляющего сигнала:  $\varphi = \varphi_0 + \sqrt{qP}$ . Здесь  $q$  — величина, характеризующая качество М. с., зависящее от кристалла, его геометрии и от отношения длины кристалла к площади его поперечного сечения и не зависящее от того, используется продольный или поперечный электрооптич. эффект. Предел увеличению величины  $q$  кладут дифракц. эффекты. Для получения фазовой задержки в 1 ради-

ан необходима управляющая мощность  $P = q^{-1}$ . При использовании оптич. светодиода эта величина может быть существенно уменьшена, т. к. свет по световоду распространяется без дифракц. потерь на большие расстояния.

На высоких частотах следует учитывать изменение фазы модулирующего сигнала за время прохождения светом кристалла. В этом случае

$$\varphi = \frac{\pi}{U_{\lambda} l} \int E_0 \cos(\Omega t - k_M z) dz,$$

где  $E_0$ ,  $\Omega$  и  $k_M$  — амплитуда, частота и волновое число модулирующего электр. поля,  $z$  — направление распространения света в кристалле. При этом длина модулирующего элемента не должна превышать величины  $l = \pi \Omega^{-1} (\nu^2 - \nu^2_M)^{-1}$ , где  $\nu$  — скорость света в кристалле, а  $\nu_M$  — фазовая скорость управляющего сигнала.

В качестве материалов для фазовых модуляторов света обычно используют кристаллы  $ADP$  ( $NH_4H_2PO_4$ ),  $KDP$  ( $KH_2PO_4$ ),  $DKDP$  ( $KD_2PO_4$ ), виобит лития ( $LiNbO_3$ ), танталат лития ( $LiTaO_3$ ). Полувольтные напряжения модуляторов меняются от 100 В для длинных и тонких кристаллов в поперечном поле до 5 кВ в М. с., использующих широкие кристаллы в продольном поле.

Амплитудные М. с. с поляризационной ищечкой отличаются от фазовых М. с. наличием двух скрещённых поляризаторов (рис. 1, а), между к-рыми находится кристалл. Рис. 1, б поясняет ориентацию векторов пропускания  $e_1$  и  $e_2$  поляризаторов по отношению к векторам поляризации  $d_1$  и  $d_2$  среды.

Световой поток, поляризованный входным поляризатором вдоль вектора  $e_1$ , распадается в анизотропном элементе на волны, поляризованные вдоль  $d_1$  и  $d_2$ . На выходе элемента эти волны приобретают фазовые задержки:

$\varphi_1 = \varphi_0 + \pi n_0^3 \gamma_1 E l / \lambda$  и  $\varphi_2 = \varphi_0 + \pi n_0^3 \gamma_2 E l / \lambda$  и оказываются сдвинутыми по фазе на  $\Gamma = \varphi_1 - \varphi_2$ . Выходной поляризатор пропускает только компоненты волн, параллельные  $e_2$ . Интенсивность света на выходе поляризад. ищечки равна  $I = I_0 \sin^2(\Gamma/2)$ . Разность фаз  $\Gamma$  содержит константу  $\Gamma_0$  за счёт естества анизотропии кристалла  $\Gamma_0 = \varphi_01 - \varphi_02 = 2\pi l(n_1 - n_2) / \lambda$  и переменную  $\Gamma_{\infty}$ , наведённую электр. полем,  $\Gamma_{\infty} = \pi U / U_{\lambda}$ , где  $U_{\lambda} = h \lambda / (n_2^2 \gamma_2 - n_1^2 \gamma_1)$ .

Зависимость интенсивности света от фазовой задержки  $\Gamma_{\infty}$  (или напряжения  $U / U_{\lambda}$ ), называемая амплитудной характеристикой М. с., имеет линейный и ищечный участки (рис. 2). Режим работы М. с. (смещение рабочей точки) определяется величиной  $\Gamma_0$ . При  $\Gamma_0 = 0$  М. с. работает на квадратичном участке характеристики (рис. 2, а), при  $\Gamma_0 = \pi/2$  — на линейном участке (рис. 2, б). Из рисунка видно, что переменная составляющая света  $I_{\infty}$  во втором случае значительно больше, чем в первом. При разработке практич. схем М. с. учитывать, что величина  $\Gamma_0$  должна быть меньше  $\pi$ , иначе небольшие изменения показателей преломления или длины кристалла, обусловленные, напр., изменением тем-ры, смещают рабочую точку по амплитудной характеристике в нелинейную область и изменяют (уменьшают) переменную составляющую света на выходе. Аналогичным образом на амплитудную характеристику влияет и расхождение светового пучка,

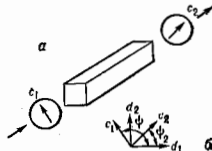


Рис. 1. Амплитудный модулятор света с поляризационной ищечкой.



Поэтому в практич. схемах М. с. свет направляют вдоль оптич. оси кристалла ( $\gamma_1 = \gamma_2$ ) или принимают схемы компенсации естеств. анизотропии кристаллов. На рис. 3 изображена одна из таких схем. Анизотропный элемент состоит из двух идентичных кристаллов 2, между к-рыми расположена полуволновая пластина 4, ориентированная так, что поляризация проходящего

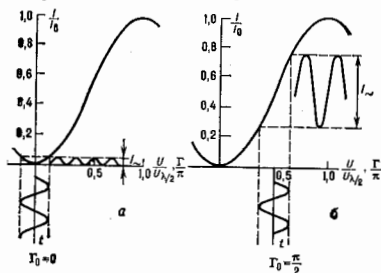


Рис. 2. Амплитудная характеристика модулятора света: а — работа на линейном участке при  $\Gamma_0 = 0$ ; б — работа на линейном участке при  $\Gamma_0 = \pi/2$ .

через неё света поворачивается на  $90^\circ$ . Поэтому световая волна, к-рая в первом кристалле была «медленной», становится по второму кристалле «быстрой», и наоборот, так что разность фаз за счёт естеств. анизотропии на выходе элемента равна нулю. Одновременно меняют знак управляющего поля при переходе от первого кристалла ко второму, что приводит к суммированию наведённого сдвига фаз в кристаллах.

Конструкция М. с. существенно зависит от диапазона их рабочих частот. На низких частотах (до 100 МГц) М. с. представляют собой конденсатор, образованный электродами и заполненный электроопт. средой. В диапазоне 100—3000 МГц применяют М. с. с тороидальными резонаторами, ёмкостный зазор к-рых заполнен электроопт. средой. Уменьшение габаритов таких М. с. на частотах 100—500 МГц достигается заменой сплошного центрального стержня резонатора на спиральный, что позволяет увеличить его индуктивность. В диапазоне св. 3000 МГц используют объёмные резонаторы, полностью или частично заполненные электроопт. средой.

Например 100 типов М. с., выпускаемых в настоящее время, большинство являются поляризационными. Их полуволновые напряжения лежат в пределах от 90 В до 4 кВ, полосы частот модуляции от неск. МГц до 1 ГГц.

Рис. 3. Модулятор света с компенсацией естественной анизотропии за счёт применения полуволновой пластины: 1 — поляризаторы; 2 — электрооптические элементы; 3 — электроды; 4 — полуволновая пластина; 5 — световой пучок.

Кроме материалов, применяемых при создании фазовых модуляторов, в поляризац. ячейках используют  $\text{Ba}_2\text{SiO}_{20}$ , а в ИК-диапазоне — арсенид галлия (GaAs) и теллурид кадмия (CdTe). В нек-рых случаях используются поляризац. ячейки с центросимметричными средами, напр. с жидкостями типа нитробензола. В таких веществах изменение показателя преломления пропорц. квадрату электрич. поля:  $\Gamma = 2\lambda B E^2$ , где  $B$  — постоянная Керра. Полуволновые напряжения в таких ячейках составляют 12—45 кВ.

Интерференционные М. с. Интерференц. схемы преобразования фазовой модуляции в амплитудную не

нашли такого широкого применения, как поляризац. элементы. Это связано с тем, что интерференционные М. с. более сложны конструктивно, требуют точной юстировки, чувствительны к вибрациям и др. внеш. воздействиям. Интерференционные М. с. применяют в контрольно-измерит. технике как датчики темп-ры и деформации, линейных и угл. перемещений. При-

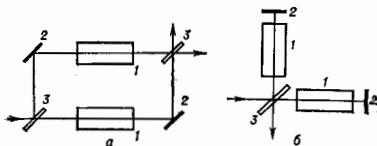


Рис. 4. Интерференционные модуляторы света на основе интерферометров Рокжестественского (а) и Майкельсона (б): 1 — электрооптические элементы; 2 — зеркала; 3 — полупрозрачные элементы.

ципальные схемы интерференционных М. с. на основе интерферометров Рокжестественского и Майкельсона приведены на рис. 4. Световой пучок, входящий в интерференц. модулятор, должен быть линейно поляризован вдоль одного из векторов поляризации  $d_1$  или  $d_2$ , соответствующих макс. электроопт. эффекту. Светоделительный элемент  $S'$  разделяет световой пучок на два луча с одинаковыми амплитудами и направляет их через два фазовых М. с. При прохождении через светоделительный элемент  $S'$  лучи интерферируют. Интенсивность света на выходе интерферометра описывается такой же ф-цией, как интенсивность поляризац. М. с. Если фазовые электроопт. элементы идентичны, а напряжения на них поданы в противофазе, то

$$\Gamma_0 = 2\pi\Delta l/\lambda, \quad \Gamma_\infty = 2\pi U/U_{\pi/2},$$

где  $\Delta l$  — разность длин пути первого и второго лучей. В интерференционных модуляторах используют те же материалы, что и в поляризац. М. с. Особенно эффективны интерференционные М. с. в плёночном исполнении в системах *интегральной оптики*.

Интергально-оптические М. с. находятся в последнее время всё более широкого применения. В качестве материала для их создания используют, как правило, ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ). На поверхности этого материала методом диффузии титана создают необходимую световодную конфигурацию. Между световодами выполняются электроды. Прикладывая напряжение к электродам, можно изменять скорость распространения света по световодам. Среди интегрально-опт. М. с. наиб. применение нашёл модифициров. интерферометр Маха — Цейдера, изображённый на рис. 5. В этой струк-

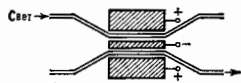
Рис. 5. Плёночный (волноводный) интерференционный модулятор света.

туре ширина световода не должна превышать неск. мкм, чтобы волновой был одномодовым. Роль светоделительных элементов в данном случае играют  $Y$ -образные разветвления. Если пришедшие к выходу интерферометра волны оказываются в фазе, то они складываются, если в противофазе — то образуют волну второй моды, к-рая не может распространяться по световоду и излучается в подложку. При распространении по световоду свет не дифрагирует, поэтому длина интегрально-опт. М. с. может достигать нескольких см. Т. о., отношение размеров модулятора  $l/\lambda$  достигает  $10^4$ . В этом случае полуволновое напряжение со-

становляет 0,3 В. Однако увеличение длины модулятора сопровождается сужением полосы частот модуляции. При длине модулятора из  $\text{LiNbO}_3$   $l = 1$  см полоса частот равна 1 ГГц.

Другой тип интегрально-оптич. М. с. изображён на рис. 6. Модулятор представляет собой два близко расположенных световода на поверхности пьезота лития.

Рис. 6. Интегрально-оптический переключатель света на два положения.



Длина световодов и расстояние между ними подобраны так, чтобы в отсутствие внеш. поля свет из первого световода полностью перекачивался во второй за счёт туннельного эффекта. При подаче на электроды внеш. напряжения скорости распространения волн в световодах становятся различными и перекачка энергии из первого световода во второй прекращается. Такие М.с. являются по существу переклюкателями света на два положения. Для получения туннельной перекачки энергии расстояние между световодами должно составлять ок. 5 мкм при длине световодов в неск. мкм.

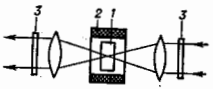
М. с. на сдвиге края полосы поглощения. Для амплитудной модуляции света может быть использовано изменение коэф. поглощения света средой под действием электрич. поля. Такое управляемое изменение коэф. поглощения имеет место в полупроводниках (Ge, Si, GaAs, CdS и др.). У этих материалов имеется резкий край полосы оптич. поглощения, к-рый может смещаться в сторону более длинных волн при наложении электр. поля (эффект Франца — Келдыша). Эффект имеет малую иверсионность  $\sim 10^{-13}$  с. К сожалению, край полосы поглощения сдвигается очень слабо и для модуляции используют только свет, длина волны к-рого лежит у самого края полосы поглощения материала. При этом необходимые напряжённости управляющего электр. поля велики ( $\sim 10^7$  В/м), поэтому М. с. на сдвиге края полосы применяют редко.

Магнитооптические М. с. Среди многочисл. магнитооптич. эффектов наиб. применение для модуляции света нашёл эффект Фарадея. Принципиальная схема фарадеевского М. с. приведена на рис. 7. Изменяющийся магн. поле катушки 2 приводит к периодич. изменению угла вращения плоскости поляризации света в магнитооптич. элементе 1. Интенсивность света, прошедшего через такую систему, равна

$$I = I_0 \cos^2(\varphi_0 + \varphi_1 \sin \Omega t),$$

где  $\varphi_0$  — угол отност. поворота первого и второго поляризаторов 3,  $\varphi_1$  — макс. угол вращения плоскости поляризации в элементе,  $\Omega$  — частота приложенного магн. поля. В парамагн. и диамагн. материалах

Рис. 7. Магнитооптический модулятор света: 1 — магнитооптический элемент; 2 — катушка, создающая магнитное поле; 3 — поляризаторы.



для вращения плоскости поляризации на десятки градусов необходимы магн. поля в  $10^6$ — $10^7$  А/м. В ферромагнетиках эффект Фарадея пропорционален не управляющему магн. полю, а намагничённости образца. Это позволяет значительно уменьшить управляющее магн. поле. Очень большую роль при этом играет форма ферромагн. элемента. Так, для плоской пластинки, намагничиваемой перпендикулярно её плоскости, намагничивающее поле равно  $2H_0$  ( $H_0$  — намагничивающая насыщенность), для сферич. элемента намагничивающий фактор в 3 раза меньше, а для длинного тонкого цилиндра, намагниченного вдоль оси, — во много

раз меньше. Важной особенностью магнитооптич. М. с. является постоянство коэф. углового вращения плоскости поляризации мн. материалов в ИК-диапазоне. Это значительно повышает их конкурентоспособность в ИК-диапазоне по сравнению с электрооптическими, в к-рых управляющее напряжение линейно растёт с увеличением  $\lambda$ . Дополнит. преимуществом является слабая зависимость эффекта Фарадея от темп-ры. В магнитооптич. М. с. используются ферриматы, монокристаллы  $\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{CrB}_2$ ,  $\text{RbNiF}_3$  и нек-рые др. В этих материалах при магн. поле  $\sim 10^6$  А/м удается достичь глубины модуляции  $\sim 40\%$  на частотах до 200 МГц при управляющей мощности 0,1 Вт.

Акустооптические М. с. Изменение показателя преломления вещества возможно не только при воздействии электрич. и магн. полей, но и при механич. деформациях упругой среды (фотоупругость). М. с. на двулучепреломлении за счёт фотоупругости подобны поляризационным электрооптическим. Отличие состоит в том, что разность фаз Г возникает под действием механич. напряжений, созданных спец. пьезообразователем,  $\Gamma = 2l\Delta n/\lambda = l n^3 p/\mu \lambda$ , где  $p$  — упругооптич. коэф., и — деформация среды.

Акустооптич. М. с. на двулучепреломлении довольно эффективны на низких частотах, а на высокой УЗ-частоте преимущество имеют М. с., использующие дифракцию света на ультразвуке. Акустич. волна, распространяющаяся в оптичски прозрачной среде, сопровождается появлением в этой среде бегущей периодич. последовательности изменений показателя преломления. Образуется структура, аналогичная дифракцион-

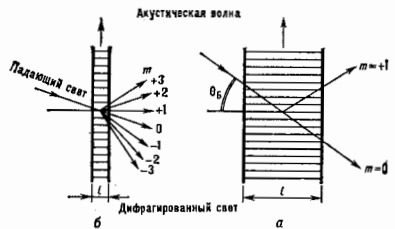
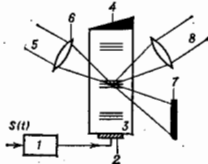


Рис. 8. Схема дифракции света на звуковой волне: а — при большом  $l$  (пространственная решётка); б — при малом  $l$  (плоская решётка).

ной решётке. Если период этой структуры меньше ширины светового пучка, то на ней происходит дифракция света. Характер этой дифракции существенно зависит от длины области взаимодействия света и звука  $l$  (рис. 8). При большом  $l$  (рис. 8,а) дифракц. решётка является трёхмерной; характер дифракции подобен дифракции рентгеновских лучей на кристаллич. решётке (дифракция Брэгга). Угол падения света должен быть близок к углу Брэгга  $\theta_B = \arcsin(\lambda/2l\lambda)$ , где  $\lambda$  — длина волны звука. При дифракции Брэгга обычно наблюдается только один боковой дифракц. максимум. При малом  $l$  (рис. 8,б) решётка может считаться плоской. Дифракц. картина представляет собой набор дифракц. максимумов, расположенных симметрично относительно падающего света (дифракция Рамана — Нага). Она происходит при любом угле падения света на УЗ-столб. Частота света в  $m$ -м дифракц. максимуме равна  $\omega + m\Omega$ , где  $\omega$  — частота света,  $\Omega$  — частота звука. Т. о., акустооптич. взаимодействие позволяет изменять частоту света. Фаза света в нулевом дифракц. максимуме зависит от амплитуды акустич. волны; происходит перераспределение интенсивности света между нулевым и боковыми максимумами. В соответствии с этим возможны разл. виды акустооптич. М. с.: частотные, фазовые и амплитудные.

тудные. Кроме того, информация в световой пучок можно вносить, модулируя его как во времени, так и по пространству. Однако поскольку создаваемое упругой волной пространство, распределение показателя преломления движется со скоростью звука, то в акустооптич. пространствах М. с. выходной сигнал оказывается промодулированным также во времени. Практич. применение нашли модуляторы интенсивности света с бегущей и стоячей акустич. волной, а также пространства М. с., являющиеся основой акустооптич. процессоров. Принципиальная схема акустооптич. М. с. на бегущей волне представлена на рис. 9. Электрич. колебания от генератора 1 модулируются по амплитуде инфрамод. сигналом  $S(t)$  и поступают на

Рис. 9. Схема акустооптич. модулятора света на бегущей волне:  $S(t)$  — модулирующий сигнал; 1 — генератор электрических колебаний; 2 — пьезопреобразователь; 3 — звукопровод; 4 — поглотитель; 5 — световой пучок; 6 — линза; 7 — экран; 8 — боковой дифракционный максимум.



пьезопреобразователь 2. Акустич. волна от пьезообразователя бежит по звукопроводу 3 до поглотителя звука 4 и создаёт дифракц. структуру, на к-рой дифрагирует световой пучок 5. Нулевой дифракц. максимум задерживается экраном 7, а боковой дифракц. максимум 8 оказывается промодулированным по закону  $S(t)$ . Быстродействие этого М. с. определяется временем прохождения звука через диаметр светового пучка и составляет 10—100 нс. Такие акустооптич. М. с. отличаются высоким контрастом модуляции (отношение интенсивностей света в максимуме при наличии акустич. сигнала и в его отсутствие), достигающим 2000 : 1. Для модуляции света с фиксиров. частотой (напр., при синхронизации мод лазера) используют акустооптич. М. с. на стоячей акустич. волне. Конструктивно они отличаются от изображённого на рис. 9 отсутствием поглотителя звука. Стоячая акустич. волна возбуждается в среде неподвижную дифракц. решётку, амплитуда к-рой меняется по гармонич. закону с удвоенной частотой звука; это приводит к 100%-вой модуляции света в боковом максимуме. Частота звука при этом должна совпадать с собств. частотой акустич. резонатора, образованного звукопроводом.

В качестве материалов для акустооптич. М. с. используют *оптические стекла* (тяжёлый флинт ФТ7), кристаллы  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{TeO}_2$ , а в ИК-диапазоне —  $\text{Ge}$  и  $\text{GaAs}$ . Эффективность дифракции света в этих материалах достигает 20—80% при акустич. мощностях 1—5 Вт на частотах 40 ÷ 250 МГц.

Пространственные М. с. Описанные выше М. с. (кроме акустооптич.) осуществляют модуляцию, равномерную по всему поперечному сечению пучка света. Между тем оптич. луч способен переносить значительно больший объём информации, если осуществить пространство. модуляцию света, различную в каждой точке поперечного сечения луча. Мин. размеры площадки в поперечном сечении светового луча, способной перевести независимую информацию, ограничены вследствие дифракции света площадью  $s > \lambda^2$ , т. е. очень малой величиной. Поэтому инфрамод. ёмкость пространств. М. с. пропорц. площади поперечного сечения светового луча. Пространств. М. с. позволяют создавать управляемые голографич. транспаранты, устройства ввода и обработки информации и оперативной памяти оптич. вычислит. машин; решать ряд проблем совр. телевизионной техники (воспроизведение изображений в большом акрае и т. п.).

Одн. элементом пространств. М. с. является слой, обладающий продольным электрооптич. эффектом. На его поверхности записывается определ. потенциальный рельеф. Проходящий через этот слой широкий пучок света оказывается промодулированным в каждой точке поперечного сечения в соответствии с потенциальным рельефом, записанным на поверхности. При этом в зависимости от направления поляризации света его модуляция может быть амплитудной или фазовой (см. *Фазовая рельефография*).

Различают два осн. метода создания потенциального рельефа на поверхности модулирующего слоя: оптич. и электрон. Принципиальная схема пространств. М. с. с оптич. записью информации приведена на рис. 10. На оптически прозрачной подложке разме-

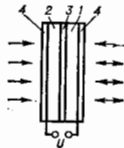


Рис. 10. Пространственный модулятор света с оптической записью информации: 1 — электрооптический кристалл; 2 — фотоэлектрон; 3 — диэлектрическое зеркало; 4 — прозрачные электроды.

щаются электрооптич. и фотопроводящий слои, разделённые диэлектрич. зеркалом. Снаружи располагаются прозрачные электроды, к к-рым приложено пост. напряжение. В отсутствие света это напряжение в осн. приложено к фотослою, обладающему высоким темновым сопротивлением. Падающий слева свет уменьшает сопротивление фотопроводника, и напряжение в освещённой точке оказывается приложенным к электрооптич. слою. Т. о., изображение, проецируемое слева на модулятор, создаёт пространств. рельеф на электрооптич. слое, а падающий справа свет используется для считывания записанной информации. В качестве электрооптич. слоя применяют электрооптич. или *жидкие кристаллы*. Жидкий кристалл обладает диэлектрич. анизотропией, т. е. диэлектрич. проницаемостью вдоль осей  $\epsilon_1$ , различны. При наложении электр. поля молекулы жидкого кристалла стремятся ориентироваться так, чтобы иметь наб. диэлектрич. проницаемость вдоль  $E$ . Упругие силы стремятся вернуть молекулы в исходное положение, определяемое граничными условиями на поверхностях слоя. Изменение показателя преломления при воздействии поля используется так же, как и в электрооптич. кристалле. Полувольное напряжение для жидких кристаллов составляет веск. В. Характерные времена электрооптич. переключения жидких кристаллов составляют  $\sim 10^{-3}$  с, а время релаксации к исходному состоянию на 1—2 порядка больше. Достоинствами жидкокристаллич. пространственных М. с. являются низкое рабочее напряжение и удовлетворительное разрешение (60—100 л/мм), определяемое малой толщиной слоя жидкого кристалла (2—50 мкм); недостатки жидкокристаллич. слоёв — высокая чувствительность к темп-ре, малое время хранения записанной информации и большое время записи. Пространств. М. с. с электрооптич. кристаллом лишены этих недостатков, но требуют для своей работы значительно больших напряжений и обладают меньшим разрешением ( $\sim 10$  л/мм). Пространств. М. с. с оптич. записью может быть применён для преобразования легкорегентов изображения в когерентное, для сложения и вычитания изображений, выделения движущейся части изображения и т. д. Нег-рым недостатком М. с. с оптич. записью является влияние считывающего света на фотопроводник, что не позволяет использовать для считывания информации свет большой интенсивности. Для получения изображений с высокой яркостью используют модуляторы с электронной записью ин-

формации (рис. 11). Под влиянием бомбардировки кристалла сканирующим электронным лучом с его поверхности выносятся вторичные электроны, собираемые коллекторной сеткой. Заряд каждой точки поверхности кристалла определяется силой тока электронного луча и потенциалом поверхности в точке бомбардировки. Управляя любой из этих величин, можно записать на поверхности необходимый потенциальный рельеф.

Эфф. использование считывающего света возможно только в том случае, когда глубина потенциального рельефа на поверхности кристалла близка к  $U_{\lambda_0}$ . При этом в пространстве М. с. необходимо использовать электрооптич. кристаллы с малым  $U_{\lambda_0}$ , т. к. большие разности потенциалов приводят к перераспределению вторичных электронов и искажению изображения.



В обычно применяемых кристаллах типа *KDP* полюсовое напряжение можно значительно снизить, охлаждая кристалл до температуры, близкой к точке Кюри  $T_K$ . Электрооптич. коэф. этих кристаллов  $\gamma$  изменяется с понижением темп-ры по закону  $\gamma = \gamma_0 \text{ Вейса} = a/(T - T_K)$ . Поэтому  $U_{\lambda_0}$  пропорционально  $(T - T_K)$ . Дополнит. преимуществом охлаждения устройства является то, что при работе вблизи точки Кюри увеличивается до неск. часов время, в течение к-рого сохраняется записанный на поверхности потенциал рельеф. Охлаждение применяется и в пространстве М. с. с оптич. записью.

**Внутрирезонаторные лазерные М. с.** Кроме описанных выше М. с., воздействующих на проходящий световой пучок, возможно управление оптич. излучением при его генерации. Напр., модуляция излучения полупроводникового лазера осуществляется модуляцией тока накачки. В газовых и твердотельных лазерах внесение в резонатор переменных потерь приводит к амплитудной модуляции излучения. При этом внутрирезонаторная модуляция, как правило, значительно эффективнее модуляции проходящего света. Введение в резонатор лазера фазового М. с. позволяет изменять оптич. длину резонатора и осуществлять частотную модуляцию излучения. Полоса частот внутрирезонаторных М. с. должна быть меньше разности частот генерируемых лазером мод  $\Delta\nu$ . При приближении частоты веш. воздействия к  $\Delta\nu$  начинается эфф. взаимодействие между модами лазера, приводящее к синхронизации мод и генерации лазером коротких оптич. импульсов. Осн. недостатком внутрирезонаторных М. с. является то, что внесение в резонатор дополнит. элементов снижает общую мощность излучения лазера и ухудшает стабильность генерации.

Лит.: Мустель Е. Р., Парыгин В. Н., Методы модуляции и сканирования света, М., 1970; Маэри Ж., Дювои Ж., Азари Ж. П., Устройства воспроизведения изображений, основанные на эффекте Поккельса, и их применение, в сб.: Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений, т. 1, под ред. В. Нейзана, пер. с англ., М., 1978; Валакши В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е., Физические основы оптики, М., 1985; Парыгин В. Н., Валакши В. И., Оптичная обработка информации, М., 1987; Пространственные модуляторы света, М., 1987.

В. Н. Парыгин.

**МОДУЛЯЦИИ ДОВЕРНОСТИ МЕТОД** — в квантовой электронике метод получения одиночных коротких импульсов лазерного излучения большой мощности, при к-ром добротность оптич. резонатора лазера быстро увеличивается от небольших начальных значений до очень больших. М. д. осуществляется с помощью электромеханич. и оптомеханич. затворов (см.

Оптический затвор) или нелинейных преломляющихся фильтров (см. Лазер, Светофильтр).

**МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ** — неустойчивость нелинейной волновой среды, возникающая вследствие резонанса биекции на частоте  $\omega_2 = \omega_1 \pm \Omega$ , образованной волной накачки  $\omega_1$  и близкой по частоте модой волновой среды  $\omega_2$ , с несобственными волнами, распространяющимися со скоростями, близкими к групповой скорости волны накачки. М. н. — разновидность параметрической неустойчивости, она определяет процесс коллапсирования волн в нелинейных волновых средах. В. Н. Орловский.

**МОДУЛЯЦИЯ** (от лат. modulator — мерность, размерность) — изменение по заданному закону во времени параметров, характеризующих к.-л. стационарный процесс. Примеры М.: изменение по опред. закону амплитуды, частоты или фазы гармонич. колебания для внесения в колебат. процесс требуемой информации (см. Модулированные колебания, Модуляция колебаний); изменение во времени интенсивности электронного потока в электропн-лучовом осциллографе, осуществляемое с помощью спец. электрода (модулятор а) и приводящее к соответствующему изменению яркости свечения экрана трубки; управление яркостью света с помощью поляризирующих устройств и ячейки Керра (см. Модуляция света); изменение скорости электронов и плотности пучка в электронном потоке в кластроне и др. В этих случаях один или неск. параметров, характеризующих стационарный процесс (напр., интенсивность, амплитуда, скорость, частота), изменяются синхронно с модулирующим воздействием.

Иногда говорят о пространств. М. — изменении параметров стационарного процесса в пространстве. В нелинейных колебат. и волновых системах возможно спонтанное возникновение М. (т. н. а в т о м о д у л я ц и я).

**МОДУЛЯЦИЯ КОЛЕБАНИЙ** — изменение разл. характеристик колебаний, медленное по сравнению с их периодом (см. Модулированные колебания).

**МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА** (модуляция оптического излучения) — изменение по заданному закону во времени амплитуды (интенсивности), частоты, фазы или поляризации колебаний оптич. излучения. Применяется для управления световыми пучками с целью передачи информации при помощи оптич. сигналов или для формирования световых потоков с опред. параметрами. В зависимости от того, какая характеристика подвергается изменению, различают амплитудную, фазовую, частотную или поляризацонную М. с. Для излучений видимого и ближнего ИК-диапазонов ( $10^{14}$ — $8 \cdot 10^{14}$  Гц) возможные частоты модуляции с верх. пределом до  $10^{11}$ — $10^{12}$  Гц. Е с т е с т в е н н а я М. с. происходит при испускании света элементарными излучателями (атомами, ионами); независимость испускания такими излучателями фотонов и различие в частоте последних приводит к тому, что излучение содержит набор частот и флукутирует по амплитуде, т. е. является амплитудно-частотно-модулированным. Е с т е с т . частотная М. с. происходит также при неупругом рассеянии света на внутримолекулярных колебаниях (см. Комбинационное рассеяние света) и на укоргах волнах в конденсаторах, средах (см. Мандельштам — Бриллюэнское рассеяние). В обоих случаях рассеянный свет содержит частоты, отличные от частот падающего света.

М. с. при к-рой преобразование излучения происходит в процессе его формирования непосредственно в источнике (генераторе) оптич. излучения, наз. в н у т р е н н о й М. с. При в н е ш н е й М. с. параметры излучения изменяют после его выхода из источника с помощью *модулятора света*. Т. к. регистрация излучения модулированного по частоте, фазе или поляризации сопряжена с техн. трудностями, то на практике все эти виды М. с. преобразуют в амплитудную модуляцию либо непосредственно в схеме модулятора, либо

с помощью спец. устройств, помещаемых перед приёмником излучения.

Простейшая амплитудная М. с. — это периодич. механич. прерывание светового потока с помощью колеблющихся и вращающихся заслонок, приз, зеркал, вращающихся дисков с отверстиями, растров.

Существует много способов М. с. на основе физ. эффектов (электрооптический, магнитооптический, упругооптический и др.), возникающих при распространении света в разл. средах. Для такой М. с. применяют управляемый двулучепреломляющий элемент из материала, обладающего естественной или наведённой анизотропией. Вещ. управляющее поле (напр., электрическое или поле упругих напряжений) приводит к изменению оптич. характеристик среды. В широко распространённых модуляторах на основе *Показеляса эффекта* фазовый сдвиг между обыкновенным и необыкновенным лучами линейно зависит от величины напряжённости электрич. поля, а в модуляторах на основе *Керра эффекта* — зависимость квадратичная. Для получения амплитудной М. с. электрооптич. вещество обычно помещают между скрещёнными поляризаторами. Важным свойством электрооптич. эффекта является его малая иверсионность, позволяющая осуществлять М. с. вплоть до частот  $10^{14}$  Гц. В электрооптич. модуляторах ослабление модулирующего сигнала не зависит от интенсивности модулируемого света, и потому для увеличения глубины модуляции используют многократное прохождение света через один и тот же модулирующий кристалл. Примером может служить модулятор на основе интерферометра Фабри — Перо, заполненного электрооптич. средой.

С целью увеличения объёма информации, переносимой световым лучом, используют пространств. в немую М. с., различную в каждой точке поперечного сечения пучка света. Осн. элемент пространства модулятора света — кристалл, на поверхности к-рого записывается определ. потенциальный рельеф; проходящий через кристалл пучок света оказывается промодулированным в каждой точке поперечного сечения в соответствии с потенциальным рельефом, записанным на кристалле, при этом модуляция может быть амплитудной и фазовой.

Из многочисл. магнитооптич. эффектов для М. с. наиб. применение нашёл *Фарадея эффект* в прозрачных веществах. Периодически меняющееся магн. поле приводит к периодич. изменению угла вращения плоскости поляризации света, прошедшего через магнитооптич. элемент, помещённый в магн. поле. Угол поворота плоскости поляризации пропорц. длине пути света в веществе и при достаточной прозрачности среды может быть сделан коэф. удельно большим. Важной особенностью магнитооптич. модуляторов является постоянство коэф. удельного вращения плоскости поляризации в ИК-диапазоне для волн. Это повышает конкурентоспособность магнитооптич. устройств при больших длинах волн оптич. излучения по сравнению с электрооптическими, в к-рых управляющее напряжение линейно возрастает с увеличением длины волны света. В магнитооптич. модуляторах света удаётся достичь глубины модуляции 40% на частотах модуляции до  $10^8$  Гц.

Для М. с. используют также искусственную оптич. анизотропию, к-рая возникает в первоначально изотропных твёрдых телах под действием упругих напряжений (*фотоупругость*). При прохождении плоскополяризован. излучения через фотоупругую среду с наведённым двулучепреломлением излучение становится эллиптически поляризованным. Помещая такую среду между скрещёнными поляризатором и анализатором, наблюдают амплитудную М. с., аналогичную модуляции в электрооптич. средах. Применение таких модуляторов особенно целесообразно в ИК-диапазоне, т. к. равенств фаз колебаний обыкновенного и необыкновенного лучей  $\sigma \neq 0$ , где  $\sigma$  — показатель преломления,

равный  $4 \div 6$  для веществ, прозрачных в этом диапазоне.

В основе работы акустооптич. модулятора лежит явление дифракции света на фазовой решётке, образованной периодич. изменением показателя преломления среды при прохождении через неё УЗ-волны (см. *Дифракция света на ультразвуке*).

Методы, основанные на изменении поглощения света средой, обеспечивают лишь амплитудную М. с. При этом обязательно имеют место потери световой энергии в модулирующем устройстве. Электрич. управление поглощением света полупроводниками легко может быть получено либо при изменении концентрации свободных носителей или их подвижности, либо за счёт сдвига края полосы поглощения (*Келдыша — Франца эффект*).

Внутреннюю М. с. осуществляют, используя для питания электрич. источников света переменное или импульсное-периодич. напряжение. Лампы накаливания при этом из-за своей иверсионности дают заметную глубину модуляции лишь до частот  $\sim 10^2$  Гц; газоразрядные источники света менее иверсионны и допускают модуляцию до частот  $10^3$  Гц (при глубине модуляции 50—70%).

Появление лазеров вызвало интенсивное развитие методов внутр. М. с., основанных на управлении когерентным излучением за счёт изменения параметров лазера. При этом мн. устройства, применяемые как внеш. модуляторы, помещаются внутри *оптического резонатора* лазера. Используют разл. способы внутр. модуляции, получают любой вид М. с.: амплитудной, частотной, фазовой и поляризац. Частотой излучения лазера управляют, изменяя добротность оптич. резонатора лазера, напр. меняя оптич. длину резонатора. С этой целью одно из зеркал резонатора закрепляют либо на магнитострикционном стержне (см. *Магнитострикционный преобразователь*), либо на пьезоэlemente и изменяют длину резонатора синхронно с модулирующим напряжением. Тот же эффект достигается путём изменения показателя преломления среды, заполняющей резонатор, для чего используется электрооптич. кристалл. Частотную модуляцию излучения лазера можно получить также при наложении на активную среду магн. или электрич. полей (см. *Зеемана эффект*, *Штарка эффект*), под действием к-рых происходит расщепление и смещение рабочих уровней атомов, ответственных за генерацию когерентного излучения.

Изменяя величину коэф. усиления, получают амплитудную модуляцию излучения лазера. Для этого воздействуют на разность населённости активной среды, либо изменяя мощность её возбуждения, либо используют вспомогат. возбуждение, приводящее к перераспределению населённости. Амплитудная модуляция излучения может быть получена и при помощи модуляции тока разряда газовых или полупроводниковых лазеров, работающих в непрерывном режиме. Одним из методов управления когерентным излучением является модуляция величины *обратной связи* лазера, т. е. коэф. отражения зеркал резонатора. С этой целью используют резонатор, одно из зеркал к-рого вращается с большой скоростью, и потому условия генерации выполняются лишь в короткие промежутки времени. Вместо зеркала часто используют вращающуюся призму полного внутр. отражения. Изменение величины обратной связи можно получить, заменяя одно из зеркал на систему зеркал, образующих интерферометр Фабри — Перо. Коэф. отражения такого резонатора зависит от расстояния между зеркалами, изменяя к-рое можно модулировать интенсивность излучения и получать т. н. гигантские импульсы, мощность излучения в к-рых существенно превосходит мощность непрерывной генерации. Наконец, излучение лазеров также модулируют, изменяя добротность оптич. резонатора путём введения потерь, величина к-рых управляется внеш. сигналом. Для этого используют модуляторы на основе электр.

троптич. и фотоуругих сред. Для т. «наисновое управление добротности применяет метод, основанное на введении в резонатор элементов (раствора, стекло), прозрачность к-рых меняется под действием светового излучения. Такой вид модуляции (а в том о д у л и ц и) широко используется для генерирования импульсов когерентного излучения нано- и пикосекундного диапазона.

Интересным случаем ввуст. М. с. является режим синхронизации мод, к-рый осуществляется при модуляции добротности (длины резонатора) с частотой, близкой к частоте межмодовых бегущей лазера. При синхронизации мод лазер генерирует короткие и мощные импульсы, следующие друг за другом с частотой ввеш. модуляции.

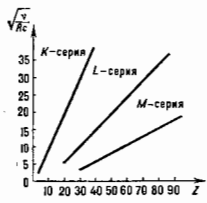
Лит. см. при ст. Модулятор света. А. Н. Копорский. **МОДЫ** (от лат. modus — мера, образ, способ, вид) — типы колебаний (нормальные колебания) в распределенных колебл. системах (см. *Объемный резонатор*, *Оптический резонатор*) или типы волн (нормальные волны) в волноводных системах и волновых пучках (см. *Волновод*, *Квазиоптика*). Термин «М.» стал употребляться также для любого волнового поля (вне его источников), обладающего опред. пространственной структурой (симметрией). Так появились понятия М. излучения лазера, «утекающая» М., поверхностная М., «спешущая галерея», экспоненциально спадающая М., сержия М. и т. д.

Лит. см. при ст. Нормальные колебания, Нормальные волны, Лазер. М. А. Миллер, Г. В. Пермитин. **МОЗАИЧНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ** — несовершенство кристаллич. структуры, состоящее в том, что монокристаллы как бы состоят из блоков, несколько разориентированных (до нек. мин.) друг относительно друга. Большинство реальных монокристаллов состоит из блоков размером ~10<sup>-4</sup> см. М. к. обусловлена дислокациями на границах блоков.

**МОЗЛИ ЗАКОН** — утверждает, что корень квадратный из частоты  $\nu$  характеристич. рентг. излучения атома хим. элемента и его ат. номер  $Z$  связаны линейной зависимостью:

$$\sqrt{\frac{\nu}{Rc}} = \frac{Z - S_n}{n}$$

( $Rc$  — Ридберга постоянная,  $S_n$  — постоянная экранирования, учитывающая



влияние на отд. электрон всех остальных электронов атома,  $n$  — гл. квантовое число). М. з. установлен экспериментально в 1913 Г. Мозли (H. Moseley). Графически зависимость  $\sqrt{\nu}$  от  $Z$  представляет собой ряд прямых (K-, L-, M- и т. д. серии, соответствующие  $n=1, 2, 3, \dots$ ; рис.). М. з. окончательно подтвердил, что  $Z$  определяется не массой атомного ядра, а его зарядом. Мозли закон — основа рентг. спектрального анализа. А. В. Нольков.

**МОЛЕКУЛА** (от лат. molecula, уменьшит. от лат. moles — масса) — наименьшая устойчивая частица вещества, обладающая его осн. хим. и физ. свойствами. Состоит из атомных ядер и электронов, связанных между собой эл.-магн. силами; можно также считать М. системой атомов, связанных друг с другом разл. связями (см. *Межатомное взаимодействие*).

Представление о М. возникло в 18 в. и с развитием в 19 в. кинетич. теории газов и становлением термодинамики получило широкое распространение. Прямое эксперим. подтверждение существования М. провёл Ж. Перрен (J. Perrin) при изучении броуновского движения (1906).

Молекулярные вещества в газовой и жидкой фазах и в молекулярных кристаллах сохраняют индивидуаль-

ность. В расплавах и ионных кристаллах М., как правило, утрачивают индивидуальность, т. к. каждый атом в них связан с большим числом окружающих его атомов.

Хим. формула М. — грубо формула — указывает все входящие в неё атомы хим. символами элементов, а также число одинаковых атомов. Порядок расположения атомов в молекуле и характер связи между ними отражает структурная ф-ла М.

М. образуется из атомов при их сближении, если энергия связанного состояния меньше суммы энергий свободных атомов. Выделяемая при образовании М. энергия может передаваться др. частям (переходит в тепло) или испускаться в виде кванта света (*тепловая люминесценция*). Соответственно, для отрыва от молекулы отд. атомов или атомных групп необходимо сообщить М. опред. энергию (энергию диссоциации). Число атомов в М. составляет от двух (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HCl, CO) до сотен и тысяч (нек-рые витамины, гормоны, белки).

Энергия отдельных хим. связей в М. составляет неск. эВ. Связь между атомами в М. осуществляется электронами валентных оболочек (валентными электронами) так, чтобы система была электронейтральной, а электронная оболочка — замкнутой. Атомы с замкнутыми в основном состоянии оболочками могут образовывать хим. связи, если их перовичи в возбужденном состоянии. Образующиеся при этом М. (напр., He<sub>2</sub>) являются метастабильными и наз. эксимерными.

М. с открытыми (незамкнутыми) электронными оболочками (напр., OH, CH<sub>2</sub>, NH<sub>2</sub>) наз. радикалами (свободными радикалами). М. и радикалы с нескомпенсированным зарядом, получающиеся при отрыве или присоединении электронов к нейтральной М. (напр., H<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>-</sup>), наз. молекулярными (радикальными) ионами. Радикалы и ионы образуются как промежуточные продукты хим. реакций, при разл. воздействиях на М. и в обычных условиях неустойчивы, но в изолиров. состоянии (напр., в космич. пространстве) могут существовать долго.

Близкими к М. образованиями являются ван-дер-ваальсовские комплексы (HCl...Ar), молекулярные ассоциаты, ионные кластеры, ван-дер-ваальсовы молекулы и т. д., связанные между собой более слабыми, чем химические, связями — водородными или ван-дер-ваальсовыми. Комплексы могут состоять из двух, трёх и т. д. М. [(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>, (NaCl)<sub>2</sub>], их называют димерами, тримерами и т. д. Ионные кластеры образуются из иона H<sub>3</sub><sup>+</sup> и молекул H<sub>2</sub> [напр., H<sub>3</sub><sup>+</sup>·H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub><sup>+</sup>(H<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, ..., H<sub>3</sub><sup>+</sup>(H<sub>2</sub>)<sub>n</sub>]. Такие системы неустойчивы и распадаются под внеш. воздействием.

В М. между валентными электронами в основном состоянии преобладает обменное взаимодействие, к-рое выстраивает спины электронов антипараллельно, поэтому осн. электронное состояние большинства М. синглетное, М. диамагнитна. Свободные радикалы обычно парамагнитны.

**Структура М.** В зависимости от числа валентных электронов, принимающих участие в хим. связи, последние наз. одианными, двойными и тройными. Напр., атомы С в М. этава C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> связаны одинарной связью С — С, в М. этилена C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> — двойной связью С = С, а в М. ацетилена C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> — тройной связью С ≡ С. Одианная связь образуется двумя валентными электронами (σ-электронами), двойная связь — четырьмя электронами (σ-электронами), а тройная связь — шестью электронами (также σ-электронами). Электроны внутр. замкнутых оболочек атомов практически не участвуют в хим. связи. Такая классификация хим. связей основана и не всегда приемлема. Она лучше всего подходит для классификации связей в разветвлённых (насыщенных) углеводородах и неприменима к циклич. угле-

водородна тиа бензола ( $C_6H_6$ ), т. к. в этом случае шесть одинаковых связей между атомами С, наз. также сопряженными связями, образуются за счёт 18 валентных электронов и рассмотренная классификация привела бы к полуторным связям.

В нек-рых случаях хим. связи образуются нечётным числом электронов. Так, в стабильном ионе  $H_2^+$  связь образована одним электроном, в ионе  $H_3^+$ , имеющем

структуру равностороннего треугольника, три связи  $H-H$  образованы всего двумя электронами и т. д. Кроме того, не все электроны внеш. электронной оболочки атомов принимают участие в хим. связи. Напр., в  $MH_2$  два из пяти внеш. электрона атома  $M$  не принимают участия в образовании связей и наз. неподелённой парой электронов. Если при образовании связи между атомами А и В электрон переносится от А к В (или обратно), то связь между А и В наз. ионной (напр.,  $NaCl$ ), а если валентные электроны распределены между А и В равномерно, то связь А—В наз. ковалентной (напр.,  $H-H$ ,  $C-S-C$ ). Обычно ковалентные связи прочнее ионных. В сопряжённых системах типа бензола электроны, связывающие атомы С, равномерно распределены по всему кольцу.

Форма  $M$  определяется соотношением расположением атомов в ней, к-рое в свою очередь определяется величинами для связей и углов между связями (валентных углов). Между кратностью и длиной связи существует корреляция: связь между определ. атомами укорачивается с ростом её кратности. Напр., типичные величины для связей  $C-C$ ,  $C=C$  и  $C\equiv C$  соответственно равны 1,50, 1,35 и 1,20 Å. Длина связи зависит от её хим. окружения в  $M$ . Напр., длина связи  $C-H$  в группе  $-CH_3$  составляет ок. 1,10 Å, а в группах  $=CH_2$  и  $\equiv CH$  1,08 и 1,05 Å соответственно. Валентные углы между связями бывают самые разные, причём углы между одними и теми же связями в разл.  $M$  могут быть различными, хотя определяются характеристичностью существует и для углов. Напр., угол между связями  $C-H$  в группе  $-CH_3$ , входящей в разл.  $M$ , часто близок к  $109^\circ$ . Если атом С образует четыре связи, то углы между ними связями близки к тетраэдрч. углу ( $109^\circ 30'$ ). Для качества описания формы  $M$ , содержащая атом С, важное значение имеет гибридизация атомных орбиталей С (см. *Молекулярная орбиталь*), т. е. образование из пары орбиталей внешних  $s$ -электронов и пары орбиталей  $p$ -электронов четырёх эквивалентных линейных комбинаций, наз. гибридными орбиталями.

Нек-рые представления о форме и геометр. симметрии  $M$ , состоящей из данного набора атомов, можно получить на основе симметрии молекулы и концепции молекулярных орбиталей (МО). В зависимости от знака вклада, вносимого электроном данной МО в полную энергию  $M$ , МО наз. разрыхляющими или связывающими: связывающие участвуют в образовании прочных хим. связей, а разрыхляющие — не участвуют. Число связывающих и разрыхляющих МО зависит только от симметрии расположения атомов в  $M$ . Поэтому определение устойчивой формы  $M$  сводится к нахождению такого расположения атомов, к-рому соответствует наиб. число связывающих МО. Напр., в случае  $CH_4$  для тетраэдрч. расположения четырёх атомов Н вокруг С (симметрия  $T_d$ ) получается наиб. число связывающих МО — 8 (напр., для симметрии  $C_{3v}$  их 6). Разл. МО вносят разный вклад в энергию, и поэтому этот метод не всегда применим, во в большинстве случаев он правильно предсказывает геом. симметрию  $M$  (напр., он позволяет установить, что  $M$   $H_2O$  — вильневая,  $M$   $CO_2$  — линейная), особенно геом. симметрию  $M$  в возбуждённых электронных состояниях. Структурные параметры для осн. электронного состояния  $M$ .  $M$  определены методами газовой электроно-

графия, микроволновой спектроскопии и др. спектральных методами.

В зависимости от изотопич. состава атомов  $M$  имеет изотопич. модификации. Напр.,  $CH_3D$ ,  $CH_2D_2$ ,  $CND_3$ ,  $CD_4$  являются изотопич. модификациями метана ( $CH_4$ ). Структурные параметры изотопич. модификаций очень близки к структурным параметрам осн.  $M$ , а малые отличия ( $\sim 0,01$  Å в длинах связей и  $\sim 1^\circ$  в валентных углах) обычно обусловлены различием колебат. поправок к структурным параметрам. Кроме того, высокосимметричные изотопич. модификации неполярных  $M$  могут быть слабо поляричны с дипольным моментом ок. 0,01 дебая.

В соответствии с симметрией *равновесной конфигурации*  $M$  можно разделить на три класса: 1)  $M$ , не имеющие осей симметрии 3-го или более высокого порядка; 2)  $M$ , имеющие одну ось симметрии 3-го или более высокого порядка; 3)  $M$ , имеющие виск. осей симметрии 3-го или более высокого порядка (см. *Симметрия молекулы*).  $M$ . этих классов наз. асимметричными, симметричными и сферич. волчками соответственно. Линейная молекула является частным случаем симметричного волчка.

Классификация энергетических уровней  $M$ . Уровни энергии  $M$  определяются из решения полного Шрёдингера уравнения методами квантовой химии. Численные решения ур-ния Шрёдингера выполнены только для очень простых  $M$  ( $H_2^+$ ,  $H_2$ ), для остальных  $M$  проводится приближённое разделение ур-ния Шрёдингера на отдельные ур-ния для электронной и ядерной подсистем. Такое разделение проводится на основании *Борна — Опенгеймера теорема*. Решение ур-ния Шрёдингера для электронов даёт электронные уровни энергии  $M$  в зависимости от координат ядер как от параметров (см. *Потенциальная поверхность*), а ур-ние Шрёдингера для ядер — колебательно-вращательные уровни энергии в разл. электронных состояниях. Ур-ние Шрёдингера для ядер также разделяют на колебательное и вращательное. Электронная энергия  $M$  и  $\sqrt{m/M}$  ( $m$  — масса электрона,  $M$  — масса ядра) раз больше колебательной, к-рая в  $\sqrt{m/M}$  раз больше вращательной, что и позволяет произвести такое разделение. Взаимодействия между разл. видами движений (электронными, колебательными, вращательными) очень важны и составляют осн. предмет исследований в совр. молекулярной спектроскопии.

Полные электронно-колебательно-вращательные (роти-бронные) уровни энергии  $M$  классифицируют по неприводимым представлениям (типам симметрии) группы симметрии молекулы. Разделение полного движения на отд. виды даёт возможность ввести приближённые квантовые числа для классификации уровней  $M$ . В большинстве случаев эти числа связаны с собств. значениями квадратов и  $z$ -проекции соответствующих угл. моментов. В спектроскопии двухатомных  $M$  используются угл. моменты и их квантовые числа, приведённые в табл.

Тип угл. момента	Оператор	Квантовые числа	
		полного момента	проекции момента на ось молекулы
Электронный орбитальный момент . . . . .	$L$	$L$	$\Lambda$
Электронный спин . . . . .	$S$	$S$	$\Sigma$
Вращательный момент . . . . .	$R$	$R$	$K$
Полный момент без электронного и ядерного спинов . . . . .	$N = R + L$	$N$	$K + \Lambda$
Полный момент без ядерного спина . . . . .	$J = R + L + S$	$J$	$\Omega = K + \Lambda + \Sigma$
Ядерный спин . . . . .	$I$	$I$	. . .
Полный момент . . . . .	$F = J + I$	$F$	. . .

Для линейных многоатомных  $M$ , симметричных и сферич. волчков кроме упомянутых угл. моментов используются также колебат. угл. моменты  $I_i$  для каждого вырожденного колебания и полный колебат. угл. момент  $I = \sum I_i$ . Для симметричных волчков важное значение имеет квантовое число  $K$  проекции вращат. угл. момента на выделенную ось симметрии  $M$ ;  $K = 0$  в невырожденных колебат. состояниях и  $K = I$  в вырожденных колебат. состояниях линейных  $M$ . Для асимметричных волчков  $K$  теряет смысл, а для обозначения вращат. уровней используется символ  $J_{K_a K_c}$ , где  $K_a$  и  $K_c$  являются проекц. квантовыми числами для предельных случаев вытянутого (а) и сплюснутого (с) симметричного волчка. Для сферич. волчков  $K$  также не имеет смысла, и вместо него используют типы симметрии уровней с данными  $J$  и их кратность.

Разл. электронные уровни с заданным  $L$  линейной  $M$  обозначают  $\Sigma, \Pi, \Delta, F, \dots$  в соответствии со значениями  $A = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Между типами симметрии и значениями  $A$  имеется взаимно однозначное соответствие, поэтому непригодные представления точечных групп  $D_{\infty h}$  и  $C_{\infty v}$  также обозначают  $\Sigma, \Pi, \Delta, F$ . Мультиплетность уровни, определяемая значениями  $2S + 1$ , записывается слева сверху  $A$ . Напр.,  $^2\Sigma$  обозначает уровень с  $\Lambda = 0$  и  $S = 1$ , а  $^3\Pi$  обозначает уровень с  $\Lambda = 1$  и  $S = 1/2$ . К этому символу добавляется значение  $J$ ,  $N$  или  $F$  для каждого вращат. подуровня, а если необходимо, то ещё и номер колебат. уровня  $v$ . Для волчьей  $M$   $\Lambda$  не имеет смысла, вместо  $\Lambda$  используется тип симметрии, а остальные обозначения сохраняются. В простейшем приближении каждому нормальному колебанию  $M$   $\nu_k$  сопоставляется гармонический осциллятор с энергией

$$\omega_k \left( v_k + \frac{1}{2} \right), \quad (1)$$

где  $\omega_k$  — волновое число,  $v_k$  — колебат. квантовое число. Состояние  $M$ , в к-ром возбуждено неск. колебаний, обозначат набором чисел  $v_k$ . Напр., состояние (1, 2, 1)  $M$ .  $H_2O$  характеризуется числами  $v_1 = 1$ ,  $v_2 = 2$  и  $v_3 = 1$  (иногда такое состояние обозначают  $v_1 + 2v_2 + v_3$ ). Если возбуждено вырожденных колебаний, то квантовые числа  $v_i$  снабжаются также верхним индексом  $l_i$ , указывающим квантовое число колебат. углового момента, равное  $\pm v_i, \pm(v_i - 2), \dots$  напр., состояние  $(2, 3^{+1}, 1)$  отвечают квантовые числа  $v_1 = 2$ ,  $v_2 = 3$ ,  $l_2 = \pm 1$ ,  $v_3 = 1$ .

**Вращательные уровни энергии  $M$ .** В  $^2\Sigma$ -состоянии. Вращат. уровни  $M$  качественно описываются в рамках модели жёсткого волчка. Вращат. энергия жёсткой (т. е. колебания её атомных ядер незначительны) двухатомной  $M$  в  $^2\Sigma$ -состоянии

$$E_r = BJ(J+1); B = \frac{h^2}{8\pi^2 I_c} (cm^2), \quad (2)$$

где  $B$  — вращат. постоянная,  $I$  — момент инерции. Ф-ла (2) справедлива также для жёсткой линейной  $M$  и для жёсткого сферич. волчка в  $^2\Sigma$ -состоянии, причём каждый  $J$  — уровень сферич. волчка  $(2J+1)$ -кратно вырожден по проекции  $J$  на одну из осей  $M$  (для линейной  $M$  эта проекция равна нулю). Для жёсткого симметричного волчка два из трёх угл. моментов инерции равны между собой и энергия

$$E_r = B_x J(J+1) + (B_z - B_x) K^2, \quad (3)$$

где  $z$  — выделенная ось симметрии волчка, а ось  $x$  перпендикулярна  $z$ . Оси инерции  $M$  принято обозначать также буквами  $a, b, c$ , причём  $I_a \leq I_b \leq I_c$ , а вращат. постоянные буквами  $A \geq B \geq C$ . В зависимости от соотношения между осями  $x, y, z$  а  $b, c$ , симметричные волчки разделяются на два класса — вытянутые, для к-рых энергия

$$E_r = BJ(J+1) + (A - B)K_a^2, \quad (4)$$

и сплюснутые, для к-рых

$$E_r = BJ(J+1) + (C - B)K_c^2. \quad (5)$$

В качестве оси квантования вращат. угл. момента в (4) выбрана ось  $a$  ( $I_b = I_c$ ), а в (5) — ось  $c$  ( $I_a = I_b$ ).

При промежуточных значениях  $B$  уровни с разл. значениями пары чисел  $K_a, K_c$  при заданном  $J$  не пересекаются, поэтому символ  $J_{K_a K_c}$  является однозначной характеристикой вращат. уровней асимметричного волчка, когда  $I_a \neq I_b \neq I_c$ . Числа  $J, K_a$  и  $K_c$  тесно связаны с числом и ориентацией узлов волновой ф-ции асимметричного волчка. Энергия увеличивается с ростом  $K_a$  и уменьшается с ростом  $K_c$ , т. е. энергия растёт в соответствии с последовательностью квантовых чисел:

$$J_{0,0}, J_{1,1}, J_{2,2}, J_{3,3}, J_{4,4}, J_{5,5}, \dots \\ \dots, J_{J-1,1}, J_{J-1,1}, J_{J,1}, J_{J,0}. \quad (6)$$

Сумма  $K_a + K_c$  равна  $J$  (при чётном  $J$ ) или  $J+1$  (при нечётном  $J$ ). Асимметрия волчка характеризуется параметром:

$$\chi = (2B - A - C)/(A - C); -1 \leq \chi \leq 1, \quad (7)$$

к-рый равен  $-1$  для вытянутого и  $+1$  для сплюснутого симметричных волчков. Поэтому вместо  $J_{K_a K_c}$  пишут также  $J_{K_-, K_+}$ . Энергия асимметричного волчка определяется только численно как собств. значения матрицы энергии, записанной в базе волновых ф-ций симметричного волчка. Отличные от нуля элементы этой матрицы равны:

$$\langle J, K | H | J, K \rangle = \frac{1}{2}(B_x + B_y)(J(J+1) + \\ + [B_z - \frac{1}{2}(B_x + B_y)]K^2), \quad (8)$$

$$\langle J, K \pm 2 | H | J, K \rangle = \frac{1}{4}(B_x - B_y) \{ [J(J+1) - \\ - K(K \pm 1)] \cdot [J(J+1) - (K \pm 1)(K \pm 2)] \}^{1/2}. \quad (9)$$

Вырождение уровней по знаку  $K_a$  и  $K_c$ , присущее симметричному волчку, для асимметричного волчка снимается недиагональными элементами в (9). Получающиеся при этом расщепление наз.  $K$ -удвоением; величина  $K$ -удвоения максимальна при  $K = 1$  и падает с ростом  $K$ .

Модель жёсткого волчка является грубым приближением к реальной  $M$ . Реально  $M$  при вращении искажается, и такое деформационное искажение даёт существенный вклад в её энергию. В случае двухатомной  $M$  основная (квартичная) центробежная поправка к (3) равна

$$-D_J J^2(J+1)^2, \quad (10)$$

где  $D_J = 4B^2/\omega^2$ , и если  $B = 1 \text{ см}^{-1}$  и  $\omega = 1000 \text{ см}^{-1}$ , то  $D_J = 4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1} = 420 \text{ кГц}$ , поправка к энергии при  $J = 10$  равна  $1,2 \text{ ГГц}$ . Для сферич. волчка (напр.,  $M. CH_4$ ) квартичная центробежная поправка состоит из двух частей:

$$-D_J J^2(J+1)^2 - D_I (J, K), \quad (11)$$

из к-рых первая — изотропная и не зависит от проекции  $J$ , а вторая — анизотропная и расщепляет уровень с заданным  $J$  на подуровни разл. типов симметрии. Напр., для  $CH_4$   $D_J = 432 \text{ кГц}$  и уровень с  $J = 2$  расщепляется на компоненты с интервалом между ними  $60 D_J$ . Ф-ция  $f(J, K)$  определяется численно. Она  $\sim J^4$ , и расщепление быстро растёт с ростом  $J$ : при заданном  $J$  её мин. значение равно  $-4J^2(J+1)^2$ , а макс. значение равно  $+8J^2(J+1)^2$ . Для симметричных волчков



центробежная поправка также состоит из двух частей, из  $k$ -рых первая

$$-D_J J^2(J+1)^2 - D_{JK} J(J+1)K^2 - D_{KK} K^4 \quad (12)$$

сдвигает уровни, а вторая, зависящая от симметрии  $M$ , может приводить к снятию вырождения уровней по янгу  $K$ . Для асимметричных вольчков центробежная поправка к энергии определяется только числом. Константы кватричного центробежного искажения зависят от квадратных членов разложения потенциальной поверхности и используются для определения гармонич. силовых постоянных  $M$ . Обычно из вращат. спектров  $M$  определяют также константы центробежных поправок более высокого порядка (секстичные, октичные и др.),  $k$ -рые содержат информацию о константах ангармонича  $M$ .

**Колесательные уровни энергии  $M$ .** В гармонич. приближении энергия колебат. уровней  $M$  определяется суммой выражений типа (1) по всем нормальным колебаниям,  $k$ -рые возбуждены в данном состоянии:

$$e_v^{(0)} = \sum_k \omega_k (v_k + d_k/2), \quad (13)$$

где  $d_k$  — степень вырождения  $k$ -го колебания. Для  $M$  типа асимметричного вольчка все гармонич. колебат. состояния невырождены и ангармонич. только сдвигает их, как правило, вниз. Кубич. и кватричные члены разложения потенц. поверхности во втором приближении теории возмущений дают след. вклад в энергию:

$$e_v^{(2)} = \sum_{j,k} x_{jk} (v_j + \frac{1}{2})(v_k + \frac{1}{2}), \quad (14)$$

где  $x_{jk}$  — постоянные ангармоничности,  $k$ -рые составляют обычно  $1 \div 10$  см<sup>-1</sup>, но для лёгких атомов возрастают до 100 см<sup>-1</sup>. В гармонич. приближении (13) энергия колебат. уровней не зависит от колебат. угловых моментов  $l_i$ . Поэтому состояния  $M$  типа симметричного и сферич. вольчков, в  $k$ -рых возбуждены вырожденные колебания, могут быть вырожденными. Это вырождение частично снимается ангармонизмом, и получающееся расщепление называется ангармонич. расщеплением. Для  $M$  такого типа энергия колебат. уровней рассчитывается по более общей, чем (14), ф-ле:

$$e_v^{(2)} = \sum_{j,k} x_{jk} (v_j + \frac{d_j}{2})(v_k + \frac{d_k}{2}) + \sum_{i,i'} g_{ii'} l_i l_{i'}, \quad (15)$$

в  $k$ -рой ангармонич. расщепление уровней представлено вторым членом. Напр., в  $M$  с симметрией  $C_{2v}$  (напр.,  $NH_3$ ) уровень с  $v_l = 2$ ,  $l_l = 0, \pm 2$  (все остальные  $v_k = 0$ ) расщепляется на подуровни с  $l_l = 0$  и  $l_l = \pm 2$  с интервалом между ними  $4g_{ll}$ , а уровень с  $v_l = 1$ ,  $l_l = \pm 1$  и  $v_{l'} = 1$ ,  $l_{l'} = \pm 1$  расщепляется на подуровни с  $l_l + l_{l'} = 0$  и  $l_l + l_{l'} = \pm 2$  с интервалом между ними  $2g_{ll}$ . Ангармонич. расщепления вырожденных колебат. уровней  $M$  типа симметричного и сферич. вольчков ( $BF_3$ ,  $SF_6$  и т. д.) играют важную роль в *многооборотном* поведении ИК-излучения.

Ф-лы (14) и (15) справедливы при отсутствии т. н. ангармонич. резонансов. Если осн. гармонич. частота  $\omega_k$  равна или близка к составной гармонич. частоте  $\omega_i + \omega_j$  и коэф. ангармоничности  $K_{ijk} \neq 0$ , то ангармонизм приводит к сильному перемешиванию состояний и аномальному сдвигу уровней, наз. случайными ангармонич. резонансами (или резонансами Ферми). Впервые такой эффект наблюдался в спектре комбинац. рассеяния света  $M$ .  $CO_2$  и был интерпретирован Э. Ферми (E. Fermi) в 1931: сильное перемешивание состояний с  $v_1 = 1$  и  $v_2^2 = 2^2$  приводит к появлению в спектре комбинац. рассеяния двух полос  $v_1$  и  $2v_2$  вблизи 1200 см<sup>-1</sup> с близкой интенсивностью (в отсутствие резонанса полоса  $2v_2$  должна была быть намного слабее).

Ангармонич. резонансы наблюдаются и при  $\omega_i \pm \omega_j \approx \omega_k \pm \omega_l$ ,  $\omega_i \approx \omega_j \pm \omega_k \pm \omega_l$  и т. д., если отличны от нуля соответствующие коэффициенты ангармоничности. Ангармоничные резонансы могут иметь место только между колебат. уровнями одинакового типа симметрии.

**Вращательные уровни вырожденных колебательных состояний.** Вращат. уровни возбужденных невырожденных колебат. состояний отличаются от вращат. уровней осн. состояния только тем, что величина вращат. и центробежных постоянных немного (на 0,1 ÷ 1%) отличаются от их величин для осн. состояния, хотя при наличии случайных резонансов вращат. структура возбуждённого состояния может быть сильно деформированной. Качество, отличие вращат. структуры вырожденных колебат. состояний от вращат. структуры невырожденных состояний определяется прежде всего наличием в вырожденных состояниях колебат. угловых моментов  $l_i$ . Для симметричного вольчка взаимодействие  $l_i$  с вращат. угловым моментом  $J$  (наз. также корриolisовым взаимодействием) вносит вклад в энергию,  $k$ -рый в первом приближении равен:

$$-2B_k J \sum_i S_i^2 l_i, \quad (16)$$

где  $S_i^2$  — постоянные корриolisова взаимодействия, зависящие от формы нормальных колебаний и структурных параметров  $M$ . Корриolisово взаимодействие даёт вклад в ангармонич. расщепление уровней с различными  $|l_i|$ . Кроме того, оно расщепляет уровень с  $\pm K, \pm l$  от уровня с  $\pm K, \mp l$ , но уровни с  $+K, +l$  и  $-K, -l$ , а также уровни с  $+K, -l$  и  $-K, +l$  остаются вырожденными: это вырождение снимается эффектами колебательно-вращат. взаимодействия более высокого порядка. В частном случае  $M$  симметрии  $C_{2v}$  при  $K = l_l = \pm 1$  (или  $Kl_l = +1$ ) происходит расщепление на подуровни величиной  $q_l J(J+1)$ , получивший назв.  $l$ -удвоения; константа  $l$ -удвоения  $q_l$  зависит от кубич. коэф. ангармоничности. Такое удвоение имеет место и для линейных молекул, для  $k$ -рых, однако,  $q_l$  зависит только от гармонич. части потенц. поверхности.

**Электронные уровни энергии  $M$ .** Численные значения энергий электронных уровней  $M$  определяются методами квантовой химии, число же уровней разл. типов симметрии и их относит. расположение могут быть найдены на основе модельных представлений и соображений симметрии. Если рассматривать  $M$  как объединённый атом (о. а.) или более простую объединённую  $M$  (о. м.) с тем же числом электронов, то возможные электронные уровни разл. типов симметрии точечной группы  $M$  можно определить, рассматривая расщепление электронных уровней о. а. или о. м. в электрич. поле яскойой  $M$  или просто корреляция между уровнями о. а. и  $M$  или же о. м. и  $M$ ,  $k$ -рая легко определяется из характеров точечных групп. Напр., о. а. для  $CH_4$  является атомом  $Ne$ , а первые три уровня  $1S_g, 3P_u, 1D_u$  коррелируют с уровнями типа  $1A_1, 3F_2, 1F_2$   $M$ .  $CH_4$  соответственно, т. е. основным уровнем  $CH_4$  является уровень  $1A_1$ , первое возбуждённое состояние  $3P_u$  атома  $Ne$  приводит к  $3F_2$ -состоянию  $CH_4$  и т. д. Ясно, что коррелируют уровни о. а. и  $M$  с одинаковой мультиплетностью. Это справедливо, пока спин-орбитальное расщепление мало, а если же оно велико, то необходимо проводить корреляцию между полными волновыми ф-циями, учитывающими спин.

Электронные уровни  $M$  можно получить также из уровней разъединённых атомов (р. а.) или групп атомов по векторной модели. При этом квантовое число  $L$  получается алгебраич. сложением проекций  $M_L$ , орбитальных моментов всех атомов,

$$L = \left| \sum_i M_{L_i} \right| \quad (17)$$

а полный электронный спин  $M$ , получается как векторная сумма спинов атомов

$$S = \sum_i S_i \quad (18)$$

Напр., если  $M$  HCN образована из атомов  $H, C, N$  в их основных состояниях  $^2S, ^3P, ^4S$  соответственно, то  $\Lambda = 1$  или  $0$  и  $S = 3, 2, 2, 1, 1, 0$  для HCN получаются след. уровни:  $^1\Sigma, ^3\Pi$ , по два уровня типа  $^2\Sigma, ^2\Pi, ^4\Sigma, ^4\Pi$ , по одному уровню  $^2\Sigma$  и  $^2\Pi$ . Уровни HCN можно получить также из уровней  $N$  и  $CN$ .

Модели о. а. и р. а. позволяют определить кол-во электронных уровней разл. типов симметрии, но не дают надёжных сведений относительно их энергии. Более полную информацию о расположении уровней и их устойчивости дают молекулярные орбитали.

Электронные уровни энергии расщепляются за счёт спин-орбитального взаимодействия на т. н. мультиплетные уровни (см. *Мультиплетность*). В случае нормаль-ной связи это расщепление равно:

$$\Delta\epsilon = A\Lambda\Sigma; \quad (19)$$

константа  $A$  спин-орбитального взаимодействия быстро растёт с ростом зарядов ядер атомов, составляющих  $M$ . Квантовые числа  $\Lambda$  и  $\Sigma$  теряют смысл хороших квантовых чисел, а расщеплённые подуровни теперь характеризуются значениями квантового числа  $\Omega = \Lambda + \Sigma$  проекции полного электронного угл. момента на ось  $M$ . Напр., уровень  $^3\Pi$  линейной  $M$ , за счёт спин-орбитального взаимодействия расщепляется на подуровни  $\Sigma^+, \Sigma^-, \Pi, \Delta$ , соответствующие значениям  $Q = 0, 0, 1, 2$ . Константа  $A$  составляет от неск. см $^{-1}$  для лёгких  $M$ , до неск. сотен см $^{-1}$  для тяжёлых  $M$ .

Калечабальная структура вырожденных электронных состояний  $M$ . Калечаб. структура синглетных электронных состояний  $M$  описывается ф-лами (13) — (15), в к-рых, однако, следует учесть зависимость частот колебаний и постоянных ангармоничности от электронного состояния. Они также описывают уровни невырожденных колебаний в вырожденных электронных состояниях. Качественно новые эффекты возникают в вырожденных электронных состояниях при возбуждении вырожденных колебаний, в основном за счёт взаимодействия колеб. угловых моментов вырожденных колебаний с электронным орбитальным угл. моментом.

Для симметричного волчка или линейной молекулы электронно-колебательные (вибронные) уровни энергии можно классифицировать по значениям квантового числа  $K = \Lambda + I$  проекции вибронного угл. момента на ось симметрии  $M$ . Электронно-колеб. взаимодействия снимают вырождение осн.  $\Lambda$  и  $I$ , и вибронные уровни энергии расщепляются. В  $M$  типа симметричного и сферич. волчка линейные члены разложения электронного гамма-тонна на по координатам вырожденных колебаний не равны нулю, расщепление вибронных уровней в этом случае наз. линейным эффектом Яна — Теллера (см. *Вибронные взаимодействия*). Энергия расщеплений  $\nu_2$  вычисляется ф-лой:

$$G = (\nu_2, l_2) = \omega_2(\nu_2 + 1) \mp 2D\omega_2(l_2 \pm 1) \quad (20)$$

при малых волчтиках параметра Яна — Теллера  $D$ . Для линейных  $M$  линейные члены разложения электронного гамма-тонна равны нулю и расщепление описывают квадратичные члены разложения (эффект Реннера). В реальных  $M$  эффекты Яна — Теллера и Реннера следует учитывать совместно с ангармонизмом и спин-орбитальным взаимодействием.

Вращательная структура вырожденных вибронных состояний. Определяющую роль в формировании вращ. структур вырожденных электронных и вибронных состояний играют взаимодействия вращ. углового момента с электронным спином и орбитальным (или вибронным) угл. моментом. В общем случае многоатом-

ной  $M$  учёт всех этих взаимодействий довольно сложен. Для двухатомных  $M$  различают неск. предельных случаев связи угл. моментов, получивших наз. с л у ч а е в Х у н д а. В случае  $a$  предполагается наличие сильного спин-орбитального взаимодействия, что справедливо для достаточно тяжёлых  $M$ . В этом случае сначала учитывают связь  $L$  и  $S$ , а затем — связь суммарного момента  $J = L + S$  с  $R$ . В случаях Хунда  $b$  спин-орбитальное взаимодействие предполагается очень слабым (справедливо для лёгких  $M$  и для всех  $\Sigma$ -состояний): сначала учитывают связь  $R$  с  $L$ , а затем  $N = R + L$  с  $S$  и получают  $J$ . Существуют и др. случаи Хунда. Ниже приведены вращ. энергии для  $M$  типа жёсткого волчка для случаев  $a, b, c$  и  $d$ .

Случай по Хунду	Вращательная энергия	Квантовые числа электронного уровня	Степень вырождения электронного уровня
a	$B_J(J+1)$	$\Lambda, S, \Sigma$	2 или 1
b	$BN(N+1)$	$\Lambda, S, \Sigma$	$2(2S+1)$ или $(2S+1)$
c	$B_J(J+1)$	$\Omega$	2 или 1
d	$BR(R+1)$	$L, \Lambda, S, \Sigma$	$(2L+1)(2S+1)$

Взаимодействие вращ. углового момента с электронными моментами приводит к сплитингу вырождения, указанного в последнем столбце этой табл. В  $\Pi$ -состоянии взаимодействие типа  $L^2J^2$  приводит к эффекту  $\Lambda$ -удвоения с величиной  $\Delta\nu = q_e J(J+1)$ , где  $q_e \approx 2B_e/v_e$ , а  $v_e$  — разность энергии и ближайшего  $\Sigma$ -состояния.

Ядерная сверхтонная структура энергии уровней  $M$ . Каждый уровень энергии  $M$  может иметь ядерную сверхтонкую структуру (СТС), обусловленную наличием у ядер элктрич. и магн. моментов. В электронном  $\Sigma$ -состоянии ядерная СТС уровня формируется в результате: 1) элктростат. взаимодействия элктрич. квадрупольного момента ядра с элктрич. полем  $M$  (квадрупольное взаимодействие или квадрупольная связь); 2) взаимодействия магн. дипольного момента ядра с магн. полем, возникающим при вращении  $M$  (ядерное спин-вращательное взаимодействие); 3) взаимодействия магн. моментов разл. ядер между собой (ядерные спин-спиновые взаимодействия).

Обычно квадрупольное взаимодействие даёт осн. вклад в СТС, но оно имеет место только для ядер со спином  $I > 1/2$  (напр., D,  $^{14}N$ , Cl, Br, I). В простейшем случае одиночного квадрупольного ядра в двухатомной  $M$  энергия квадрупольного взаимодействия описывается ф-лой

$$W_Q = -eqQ \left[ \frac{3}{4}C(C+1) - I(I+1)J(J+1) \right] \times \\ \times \left[ 2(2I-1)(2J-1)(2J+3) \right]^{-1}, \quad (21)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $q$  — градиент элктрич. поля,  $Q$  — квадрупольный момент ядра,  $J$  — вращат. квантовое число,  $I$  — спин ядра,

$$C = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1), \quad (22)$$

а  $F$  — квантовое число полного угл. момента  $F = J + I$ , получающее значения  $F = J + 1, J + I - 1, J + I - 2, \dots, J - I$ . Число  $J$  тераст смысл хорошего квантового числа, и уровни СТС классифицируются по значениям  $F$ . Напр., вращат. уровень с  $J = 1$  в случае ядра со спином  $I = 1/2$  (ядра Al, I и др.) расщепляется на три подуровня с  $F = 3/2, 1/2$  и  $1/2$  с энергией  $W_Q = +4eqQ/25, -eqQ/20$  и  $-1eqQ/50$ . Константа квадрупольной связи  $eqQ$  зависит и от типа ядра и от молекулярного окружения и изменяется в широком интервале.

Квадрупольная СТС обычно наблюдается в спектрах высокого разрешения. Спин-вращательные и спин-спиновые взаимодействия дают небольшой вклад в СТС и

имеют место для всех ядер со спином  $I \geq 1/2$  ( $I = 1/2$  для Н, F и др.). Расщепления вращат. уровней за счёт этих взаимодействий составляют обычно не более 100 кГц и наблюдаются только на уникальных установках (пучковые лазеры, электрич. резонанс в пучке и др.). Эксперим. данные по константам квадрупольной связи и спин-вращательного взаимодействия дают ценную информацию об электронном строении М., а константы спин-спиновых взаимодействий зависят только от геом. параметров М.

В вырожденных электронных состояниях важное значение имеют взаимодействия электронного спина с ядерными спинами, энергия к-рых в  $g_e \mu_B / g_I \mu_N$  раз больше энергий чисто ядерных спин-спиновых взаимодействий, где  $g_e$  и  $g_I$  — электронный и ядерный  $g$ -факторы,  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $\mu_N$  — ядерный магнетон. Электрон-ядерные спин-спиновые взаимодействия бывают двух видов: 1) классич. диполь-дипольное взаимодействие (анізотропное), энергия к-рого в общем случае произвольной М. определяется тензором второго ранга с 9 компонентами; 2) не имеющее классич. аналога изотропное контактное взаимодействие Ферми  $aSI$ , обусловленное наличием электронной спиновой плотности в месте расположения ядра. В отличие от анизотропного спин-спинового взаимодействия контактное взаимодействие имеет место только в состояниях с  $\Lambda = 0$ , аналогичных  $s$ -состояниям атомов, т. е. только атомные  $s$ -орбитали создают спиновую плотность в месте расположения ядра. Константы обоих видов взаимодействий зависят от электронной плотности М. и дают ценную информацию об электронных волновых функциях М.

Все физ. и хим. свойства М. так или иначе связаны с системой уровней энергии М. и с переходами между ними под действием внеш. возмущений.

Электрические свойства М. Молекула как система полюсов, т. е. отрицат. зарядов характеризуется определ. расположением зарядов, т. е. обладает электрич. дипольным, квадрупольным и т. д. моментами. Определяет электрич. свойства М. её дипольный момент  $\mu$ :

$$\mu = \sum_i e_i r_i, \quad (23)$$

где  $e_i, r_i$  — заряд и радиус-вектор  $i$ -й частицы, входящей в М. Вектор  $\mu$  можно разложить на составляющие  $\mu_a, \mu_b$  и  $\mu_c$  по направлениям гл. осей инерции  $a, b$  и  $c$ . Асимметрия распределения заряда  $\rho$  характеризуется квадрупольным моментом, к-рый для М. определяется так же, как и для ядра:

$$Q = \int \rho(3r^2 - 1r^2) d\tau \quad (24)$$

или

$$Q_{aa} = \sum_i e_i (3r_{ai}^2 - r_i^2). \quad (25)$$

Дипольный момент М. определяет интенсивности линий в спектрах поглощения и испускания, различные электрич. явления в газах (электрич. потери, отклонения пучков М. в неоднородных электрич. полях и т. д.). Электрич. дипольный момент М.  $d$  зависит от нормальных колебат. координат  $q_k$ , и при малых смещениях ядер из положения равновесия его можно разложить в ряд Тейлора по степеням  $q_k$ . Первый не зависящий от  $q_k$  член  $\mu_0$  этого ряда наз. постоянным дипольным моментом М. Не все М. имеют пост. дипольный момент. Он отличен от нуля, если по крайней мере одна из компонент электрич. дипольного момента принадлежит к полностью симметричному типу симметрии группы симметрии М. Если  $\mu \neq 0$ , то М. наз. полярной, а М. с  $\mu = 0$  наз. неполярными. К полярным, напр., относятся  $H_2O, NH_3$ , к неполярным —  $CH_4, BF_3, CO_2$ . С М.  $NH_3$  дипольный момент  $\mu_0$  направлен по оси симметрии  $C_3$ , в  $H_2O$   $\mu_{0a}$  — по оси  $C_2$ , а  $\mu_{0b}$  — перпендикулярно оси  $C_2$ .

Наиб. прецизионный метод определения  $\mu_0$  состоит в измерении расщепления уровней энергии и соответствующих спектральных линий при наложении на М. внеш. электрич. поля (Штарка эффект). В общем случае вращат. уровень с заданными J, K расщепляется в электрич. поле на  $(2J+1)$  компонент, т. е. к электрич. поле энергия уровня зависит ещё и от магн. квантового числа  $m$ , т. е. квантового числа проекции угл. момента  $J$  на направление поля:  $m = -J, -J+1, \dots, +J$ . Обычно напряжённость внеш. электрич. поля  $E$  выбирают так, чтобы энергия взаимодействия М. с полем  $(-\mu E)$  была значительно меньше энергии вращат. перехода. Тогда величины шарикового расщепления уровня энергии зависят от  $E$  или линейно (эффект Штарка 1-го порядка), или квадратично (эффект Штарка 2-го порядка); в общем случае она выражается как  $aE + bE^2 + \dots$ . Если поле направлено по оси  $z$ , фиксированной в пространстве, то энергия взаимодействия М. с полем будет равна  $-\mu_z E_z$ , где  $\mu_z$  — проекция  $\mu$  на ось  $z$ .

Электрич. дипольный момент обычно измеряют в единицах Дебая:  $1D = \pm 10^{-18}$  ГСЕС. Для полярных М. он составляет от долей до НК Д (напр., для  $SO, \mu_c = \mu_{0c} = 1,58D$ , для  $OCS \mu_c = 0,7124D$ , для  $KCl \mu_c = 10,27D$ , для  $NH_3 \mu_c = 1,49D$ ). Константа Штарка  $\mu E = 0,50344$  (МГц/Д)·(В/см). Поэтому при точности измерений частот ок. 10 кГц шариковое расщепление в полях  $10^2 - 10^3$  В/см достаточно велико и поддается весьма точному измерению. Обычно дипольный момент М. измеряется с точностью до 0,01 Д, но в спец. экспериментах достигнута точность вплоть до  $10^{-7}D$ .

Магнитные свойства М. В состоянии с орбитальным моментом  $L$  электрона М. имеет орбитальный магн. момент

$$\mu_L = -\mu_B L, \quad (26)$$

а в состоянии со спином  $S$  — спиновый магн. момент

$$\mu_S = -g_S \mu_B S, \quad (27)$$

где  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $g_S$  — спиновый  $g$ -фактор свободного электрона (см. Ланде множитель); знак минус указывает на то, что магн. и механич. моменты направлены антипараллельно. В  $^2\Sigma$ -состоянии ( $L=S=0$ ) электронный магн. момент отсутствует, но М. может иметь небольшой магн. момент, к-рый возникает из-за вращения М. При вращении М. происходит слабое перемешивание электронной волновой ф-ции основного состояния с волновыми ф-циями возбуждённых «парамагнитных» состояний. Кроме того, вращение ядра само по себе создаёт магн. момент. При этом возникает т. н. вращательный магн. момент с компонентами по гл. осям инерции в виде:

$$\mu_a = \mu_N a_{aa} J_a, \mu_b = \mu_N b_{bb} J_b, \mu_c = \mu_N c_{cc} J_c, \quad (28)$$

где  $\mu_N$  — ядерный магнетон и  $a_{aa}, b_{bb}, c_{cc}$  — компоненты тензора вращат.  $g$ -фактора, определяемые для основного состояния по ф-ле:

$$a_{aa} = \frac{M_p}{m_e} \sum_k z_k (r_k^2 - r_{ka}^2) - \frac{2M_p}{m_e I_a} \sum_{n \neq 0} \frac{K_n |L_n| 0 \rangle^2}{\epsilon_n - \epsilon_0}, \quad (29)$$

где  $M_p$  — масса протона,  $I_a$  — гл. моменты инерции,  $m_e$  — масса электрона,  $z_k$  — заряд  $k$ -го ядра,  $r_k$  — его радиус-вектор,  $r_{ka}$  — проекция  $r_k$  на ось  $a$ , а суммирование по  $n$  проводится по всем возбуждённым электронным состояниям, связанным с основным состоянием матричными элементами орбитального момента: первый член даёт вклад ядер, второй — вклад электронов. Очевидно, что вращат. магн. момент намагн. ( $10^3 - 10^4$  раз) меньше орбитального и спинового магн. моментов.

Энергия взаимодействия магн. момента  $\mu$  с внеш. магн. полем  $H$ , направленным по оси  $z$  лабораторной системы координат, даётся ф-лой:

$$H = -\mu_z H_z, \quad (30)$$

где

$$\mu_z = \sum_{a=b,c} \lambda_{za} \mu_{za}$$

$\lambda_{za}$  — направляющая косинусов компонентов  $\mu_z$  в гл. осях инерции относительно оси z. Можно показать, что оператор  $H$  имеет диагональные матричные элементы в состоянии  $|J, m, \Gamma\rangle$  типа симметрии  $\Gamma$ , если тип симметрии  $JM$  содержится в симметричном произведении  $[\Gamma^2]$ , т. е. если

$$\Gamma(M_z) = \Gamma(J \cdot M) \subset [\Gamma^2]. \quad (31)$$

Т. к.  $M_z$  всегда относится к полносимметричному типу симметрии и  $[\Gamma^2]$  всегда содержит полносимметричный тип, условие (30) фактически не ограничивает класс состояний, в  $K$ -рых  $H$  имеет диагональные элементы. Т. о., распределение уровней энергии во внеш. магн. поле (Зеемана эффект) происходит для всех  $M$  уже в первом приближении, т. е. наличие линейного по полю эффекта Зеемана ничем не ограничено. Величина линейного зеемановского расщепления для жёсткого асимметричного волчка даётся ф-лой:

$$H^{(1)} = -g_J \mu_B H_m, \quad (32)$$

$$g_J = \frac{1}{J(J+1)} (g_{aa} \langle J_a^2 \rangle + g_{bb} \langle J_b^2 \rangle + g_{cc} \langle J_c^2 \rangle), \quad (33)$$

ср. значение  $\langle J_a^2 \rangle$  определяют численно.

Для симметричного волчка

$$g_J = g_{bb} + (g_{aa} - g_{bb}) \frac{K^2}{J(J+1)}, \quad (34)$$

а для линейной  $M$ .  $g_J = g$ , т. е. не зависит от  $J$ . Обычно расщепления уровней энергии за счёт вращат. эффекта Зеемана малы и для их точного измерения используют магн. поля  $\sim (20-50) \cdot 10^3$  Гс. Следует отметить, что в таких сильных полях, вследствие магн. восприимчивости  $\chi$ , в  $M$ . возникает ещё и наведённый магн. момент,  $K$ -рый также вносит вклад в зеемановское расщепление.

По величине зеемановского расщепления уровней энергии определяются вращат.  $g$ -факторы и компоненты тензора  $\chi$ , а из них вычисляются электр. квадрольные моменты  $M$ . по ф-лам:

$$Q_m = -\frac{e}{2M_p} (2g_{aa} I_a - g_{bb} I_b - g_{cc} I_c) - \frac{2mc^2}{e} (2\chi_{aa} - \chi_{bb} - \chi_{cc}), \quad (35)$$

$$\alpha\beta\gamma = abc, cab, bca.$$

В вырожденных электронных состояниях зеемановская энергия определяется также ф-лой (32), в  $K$ -рой, однако, следует заменить ядерный магнетон  $\mu_N$  на магнетон Бора  $\mu_B$  и учесть, что  $g$ -факторы зависят от типа состояния и величины взаимодействия угл. моментов. Напр., в случае Хунда  $a$  в  $II$ - и  $D$ -состояниях двухатомной  $M$ . электронный магн. момент вдоль оси  $M$ . равен:

$$\mu_0 = -\mu_B (\Lambda + g_S \Sigma), \quad (36)$$

а электронный  $g$ -фактор

$$g_J = \frac{(\Lambda + \Sigma)(\Lambda + g_S \Sigma)}{J(J+1)}. \quad (37)$$

Т. к.  $\mu_B/\mu_N \sim 10^3$ , зеемановские расщепления вращат. уровней энергии вырожденных электронных состояний наблюдаются и точно измеряются уже в полях в неск. десятков Гс. Поэтому методы, основанные на эффекте Зеемана (зеемановская модуляция в микроволновой спектроскопии и лазерный магн. резонанс), используются для изучения радикалов и ионов с открытыми электронными оболочками.

Распределение  $M$ . по квантовым состояниям и статистическая сумма. Согласно Максвелла — Больцмана распределению, при тепловом равновесии число  $M$ .  $N_m$

в состоянии с энергией  $\epsilon_m$  и статистическим весом  $g_m$  пропорц. величине

$$Q_n = g_n \exp(-\epsilon_n/kT).$$

При  $T \approx 300$  К ( $kT \approx 200$  см<sup>-1</sup>) подавляющее большинство  $M$ . находится в основном электронном состоянии и распределено по вращат. уровням основного колебат. состояния, а их небольшая часть — по уровням  $II$ -колебаний (т. е. по уровням с энергией до 500—700 см<sup>-1</sup>). Если  $M$ . не содержит ядер с отличным от нуля спином, то величина  $g_n$  равна числу состояний с различными магн. квантовыми числами  $m$ , т. е.  $g_J = 2J + 1$ . В случае жёсткого волчка вращат. уровни вырождены ещё и по квантовому числу  $K$  проекции вращательного угл. момента  $J$  по одной из осей  $M$ . и  $g_J = (2J + 1)^2$ . Если  $M$ . содержит ядра  $X, Y, \dots$  с ненулевыми спинами  $I_X, I_Y, \dots$ , но не содержит тождеств. ядер (напр.,  $HCN, HCN$ ), то статистич. вес содержит множитель  $(2I_X + 1)(2I_Y + 1) \dots$ , одинаковый для всех вращат. уровней,  $K$ -рый не влияет на распределение  $M$ . по вращат. уровням. Для  $M$ ., содержащих тождеств. ядра, статистич. вес уровней с различными  $J, K$  будут иметь разл. спиновые множители. Напр., отношение спиновых статистич. весов симметричных ( $J$  чётное) и антисимметричных ( $J$  нечётное) вращат. уровней двухатомной  $M$ ., состоящей из одинаковых ядер со спином  $I$ , равно  $(I + 1)/I$ , если  $I$  чётное ( $I = 1, 2, 3, \dots$ ), или  $I/(I + 1)$ , если  $I$  полуцелое ( $I = 1/2, 3/2, \dots$ ); если  $I = 0$ , то антисимметричные уровни отсутствуют.

Полное число  $M$ . в данном объёме пропорц. сумме величин  $Q_n$  по всем состояниям  $M$ ., т. е.

$$Q = \sum_n Q_n = \sum_n g_n \exp(-\epsilon_n/kT).$$

Величина  $Q$  наз. статистической суммой или суммой по состояниям, через неё могут быть выражены все термодинамич. ф-ции идеального газа, причём учитываются все степени свободы  $M$ ., включая и её поступат. движение. Если не учитывать взаимодействие между видами внутр. движений  $M$ ., то величину  $Q$  можно представить в виде произведения поступательной ( $Q_t$ ), вращательной ( $Q_r$ ), колебательной ( $Q_v$ ) и электронной ( $Q_e$ ) статистич. сумм:

$$Q = Q_t \cdot Q_r \cdot Q_v \cdot Q_e.$$

Статистич. сумма поступат. движения  $M$ . для объёма газа  $V$  и темп-ры  $T$  равна

$$Q_t = V(2\pi mkT/h^2)^{3/2}$$

( $m$  — масса  $M$ ). Вращат. статистич. сумма для жёсткой двухатомной или линейной многоатомной  $M$ . при  $hcB \ll kT$  (без учёта ядерных спиновых статистич. весов)

$$Q_r = kT/hcB,$$

для  $M$ . типа жёсткого симметричного волчка

$$Q_r \approx \sqrt{(\pi/AB^2)(kT/hc)^3},$$

а для жёсткого асимметричного волчка

$$Q_r \approx \sqrt{(\pi/ABC)(kT/hc)^3}$$

( $A, B, C$  — вращат. постоянные). Колебат. статистич. сумма  $Q_v$  в гармонич. приближении выражается как произведение величин

$$\{1 - \exp(-hc\omega_k/kT)\}^{-g_k}$$

для каждого нормального колебания с частотой  $\omega_k$  и кратностью вырождения  $g_k$ . Если все возбуждённые электронные состояния  $M$ . сильно удалены от основного состояния (что справедливо для большинства устойчивых  $M$ .), можно положить  $Q_e \approx 1$ .

Т. о., если известны частоты нормальных колебаний и вращат. постоянные  $M$ ., то можно найти полную ста-

гистич. сумму  $Q$ , а затем вычислить термодинамич. ф-ция газа. В частности, теплоёмкость  $C_p$  одного моля газа при пост. давлении определяется по ф-ле

$$C_p = R + R \frac{d}{dT} \left[ T^2 \frac{d(\ln Q)}{dT} \right].$$

Лит.: Герцберг Г., Спектры и строение двухатомных молекул, пер. с англ., М., 1949; е го же, Двухатомные и трёхатомные спектры многоатомных молекул, пер. с англ., М., 1949; е го же, Электронные спектры и строение многоатомных молекул, пер. с англ., М., 1969; е го же, Спектры и строение простых свободных радикалов, пер. с англ., М., 1972; Тауэр Ч., Шиллов А., Радиоспектроскопия, пер. с англ., М., 1959; Вильсон Е., Демшиус Дж., Кросс П., Теория колебательных спектров молекул, пер. с англ., М., 1966; Е ля ш в и т М. А., Атомная и молекулярная спектроскопия, М., 1962; Гоу р д У., Спокс Р. Л., Microwave molecular spectra, 3 ed., N. Y., 1984; Wollrab J. E., Rotational spectra and molecular structure, N. Y., L., 1967; Molecular spectroscopy: modern research, v. 1-3, N. Y., L., 1972-85; У о р с в е л л А. В., Molecular vibrational/rotational spectra, Prague, 1982; И г р о т А. Е., High-resolution spectroscopy of transient molecules, В.- [a. o. c.], 1985. М. Р. Алиев.

**МОЛЕКУЛЫ** в атмосферах и оболочках звёзд. В атмосферах горячих звёзд спектральных классов О, В, А и F-M отсутствуют, имеются лишь атомы и ионы. В спектрах менее горячих звёзд спектральных классов G и K с темп-рой поверхности  $T \leq 6000$  К обнаруживаются следы М. В спектрах холодных красных звёзд с  $T \leq 3500$  К самой характерной особенностью является наличие сильных молекулярных полос поглощения. В соответствии с этим холодные звёзды подразделяют на 4 спектральных класса М, R, N, S. В видимом диапазоне в спектрах М-звёзд доминируют полосы TiO, у R-звёзд — CN, у N-звёзд — Ca, и у S-звёзд — ZrO. В атмосферах M- и S-звёзд наряду с TiO и ZrO найдены оксиды CO, SiO, VO, SeO, YO, CeO, LaO, а также гидриды магния, кальция, железа, кобальта, никеля и др. Существенно иной молекулярный состав атмосфер R- и N-звёзд, у к-рых кроме CN и Ca обнаружены CO, CS, SiC, а также M. ацетилен  $C_2H_2$ , карбида кремния SiC, синильной к-ты HCN и др.

Атмосферы звёзд имеют равновесный молекулярный состав, не зависящий от конкретных хим. реакций, а определяемый только темп-рой, энергиями диссоциации М. ( $\epsilon_{дис}$ ) и содержанием хим. элементов. Молекулярный водород  $H_2$ , хотя непосредственно и не наблюдается, является, обычно, доминирующим компонентом атмосферы. По числу атомов при нормальном космич. содержании элементов: [H] ~ 93% и [He] ~ 7% (см. *Распространённость элементов*). Остальные элементы составляют лишь небольшую примесь, наиб. содержание из них имеют O и/или C, к-рые идут прежде всего на образование CO, поскольку эта M. самая устойчивая ( $\epsilon_{дис} = 11,1$  эВ). Отношение [O]/[C] играет ключевую роль в формировании молекулярного состава атмосферы.

Звёзды спектральных классов M и S богаты кислородом. У них [O] > [C], и весь углерод связывается в CO, др. молекулы, содержащие C, не образуются. Оставшийся кислород идёт на образование менее устойчивых оксидов, прежде всего SiO ( $\epsilon_{дис} = 8,2$  эВ), ZrO ( $\epsilon_{дис} = 7,8$  эВ), если хватает кислорода, то TiO ( $\epsilon_{дис} = 7,0$  эВ) и т. д. вплоть до радикала OH ( $\epsilon_{дис} = 4,4$  эВ), к-рый преобразуется в  $H_2O$  и забирает весь остаток кислорода. Поэтому оксиды с  $\epsilon_{дис} < 4,4$  эВ не образуются, а соответствующие элементы дают в осн. гидриды. Различие M- и S-звёзд обусловлено разницей в кол-ве остаточного кислорода ([O] — [C]) и, возможно, повышенным содержанием тяжёлых элементов в S-звёздах.

Звёзды спектр. классов R и N являются углеродными звёздами (иногда их объединяют в один спектр. класс C). У них [C] > [O] и весь кислород захватывается в CO, др. оксиды не образуются. Оставшийся углерод идёт на образование наиб. устойчивых радикалов — CN ( $\epsilon_{дис} = 7,8$  эВ), CS ( $\epsilon_{дис} = 7,4$  эВ),  $C_2$  ( $\epsilon_{дис} = 6,2$  эВ), к-рые затем формируют более сложные органич. М.—

$C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $HCN$ ,  $HC_3N$  и др. Различие R- и N-звёзд обусловлено в основном разницей в содержании азота. Ми. звёзды спектр. классов M, R, N, S окружены протяжёнными, весьма разреженными и холодными газопыльными оболочками, образовавшимися в результате истечения вещества из атмосфер звёзд. Молекулярный состав оболочек формируется в верх. слоях атмосферы, а затем «замораживается», т. к. скорости хим. реакций с уменьшением темп-ры и плотности резко падают. Состав оболочек соответствует равновесию при  $T \approx 1000-500$  К. При таких темп-рах ряд веществ конденсируется, образуя твёрдые пылинки. ИК-излучение оболочек обусловлено в осн. тепловым излучением пыли, нагреваемой светом центр. звезды. Отд. детали в этом спектре указывают на то, что пылинки в оболочках M- и S-звёзд состоят из силикатов, а в оболочках R- и N-звёзд — из графита, ароматич. углеводородов и, возможно, карбидов.

Радиоастр. наблюдения показали, что атмосферы и оболочки многих M-звёзд являются мощными источниками маэрного излучения в радиодиапазах SiO,  $H_2O$  и OH (см. *Маэзерый эффект* в космосе). В отличие от них R- и N-звёзды не дают такого маэрного излучения, по спектр их радиозлучения содержит множество эмиссионных линий разнообразных M., не только простых — CO, CN, CS, SiS, но и сложных — SiC,  $C_2H_2$ ,  $NH_3$ , HCN, включая органические, напр. ряд цианополитинов  $HC_2N$ ,  $HC_3N$ ,  $HC_4N$ ,  $HC_5N$ ,  $HC_6N$  и их фрагментов, возникающих в результате фотодиссоциации исходных молекул  $C_2H_2$ ,  $C_3H_2$ ,  $C_4H_2$ .

М. являются крайне чувствительными индикаторами физ. условий. Поэтому анализ интенсивностей молекулярных линий и полос в спектрах звёзд и оболочек позволяет получить детальную информацию о хим. и изотопич. составе вещества (рис. 1), о строении звёзд.

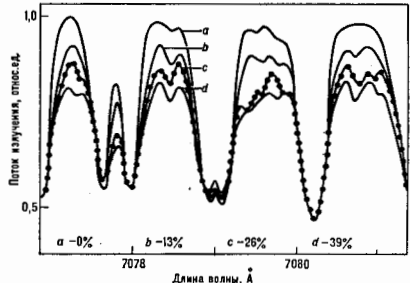


Рис. 1. Полоса поглощения TiO в спектре M-звёзды. Относительное содержание редких изотопов титана определено на сравнении рассчитанных профилей (отмечены буквами) с измеренными (точки).

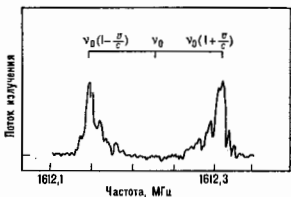


Рис. 2. Профиль линии маэрного излучения OH 1612 МГц, формирующийся в расширяющейся оболочке M-звёзды. Скорость расширения оболочки v определено по величине расщепления линии  $\Delta\nu = 2\nu_0 v/c$ .

ной атмосферы и оболочки, т. е. о радиальной зависимости плотности, состава и темп-ры газа, о поле его скорости (рис. 2) и т. п.

Лит.: Ша в р и н а А. В. Методы и результаты количественного анализа молекулярных спектров звезд, К., 1978; Р у д н и к и Г. М., Молекулы в астрофизике, в кн.: Итоги науки и техники. Исследование космического пространства, т. 20, М., 1983. Д. А. Варшавский.

**МОЛЕКУЛЫ** в межзвёздной среде. Существование М. в межзвёздной среде впервые установлено в 1938—40, когда в оптич. спектрах ряда звёзд были обнаружены узкие линии поглощения, обусловленные межзвёздными радикалами CN, CH и CH<sup>+</sup>. Их относительное содержание составляло всего ~10<sup>-8</sup>. В соответствии с этим считалось, что в межзвёздной среде встречаются только двухатомные М. и лишь в виде малой примеси. В 1968—70 с развитием радиоастр. методов впервые удалось обнаружить многоатомные М., а именно: М. воды (H<sub>2</sub>O), аммиака (NH<sub>3</sub>) и формальдегида (H<sub>2</sub>CO). Оказалось, что общее кол-во молекулярного газа в межзвёздной среде не меньше, чем атомарного. Были открыты гигантские молекулярные облака, с массой 10<sup>4</sup>—10<sup>6</sup> масс Солнца, размером ~10<sup>20</sup> см, к-рые, как выяснилось, играют ключевую роль в процессе звездообразования в Галактике.

В межзвёздной среде открыто более 80 видов М. (табл.). Неорганич. соединения представлены осн.

Межзвёздные молекулы

Число атомов	Межзвёздные молекулы							
2	H <sub>2</sub>	CO	SiO	NO	CN	SO	CH	
3	C <sub>2</sub>	CS	SIS	NS	PN	SiO <sup>+</sup>	CH <sup>+</sup>	
3	H <sub>2</sub> O	HCl	NaCl	KCl	AlCl	AlF		
3	H <sub>2</sub> S	HNO	HCN	HNC	OCS			
3	SO <sub>2</sub>	HCO	HCO <sup>+</sup>	HOC <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>			
3	H <sub>2</sub>	SiC	C <sub>2</sub> S	C <sub>2</sub> H	CH <sub>2</sub>			
3	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	NaOH	O <sub>2</sub>				
4	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> CO	HNCO	HCO <sup>+</sup>				
4	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> CS	HNCS	HCCN <sup>+</sup>				
4	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> N	C <sub>2</sub> S	C <sub>2</sub> H				
4	HC <sub>3</sub> N	NH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> NH	CH <sub>2</sub> CO				
4	HCOON	SH <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> NH				
4	CH <sub>3</sub> CN	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> SH	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>				
4	NH <sub>2</sub> NCO	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub>					
4	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>2</sub> CHCN	CH <sub>2</sub>					
4	CH <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H	CH <sub>2</sub> NH <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> NCO					
4	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> N	HCOONH <sub>2</sub>						
4	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> N	CH <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub>					
4	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> CH						
10	CH <sub>2</sub> C <sub>2</sub> N							
11	HC <sub>3</sub> CN							
12	HC <sub>4</sub> CN							

гидридами, оксидами и сульфидами. Наиб. распространённым является молекулярный водород, но молекулы H<sub>2</sub> не имеют удобных для наблюдения линий ни в видимом, ни в радиодиапазоне. Поэтому их содержание оценивается, как правило, косвенными методами. Неожиданно разнообразным оказался ассортимент органич. соединений. В межзвёздной среде обнаружены спирты (метилловый CH<sub>3</sub>OH и этиловый C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), альдегиды (формальдегид H<sub>2</sub>CO и ацетальдегид CH<sub>3</sub>CHO), простые и сложные эфиры (CH<sub>3</sub>OCH<sub>3</sub>, HCOOCH<sub>3</sub>), кислоты (HCOON, HNCO), в т. ч. синильная к-та HCN и её производные CH<sub>2</sub>CN, NH<sub>2</sub>CN, включая HC<sub>2</sub>N и цианополины HC<sub>3</sub>N, HC<sub>4</sub>N, HC<sub>5</sub>N и HC<sub>11</sub>N (последняя — наиб. тяжёлая из открытых межзвёздных М.). Кроме М. с насыщенными валентностями в межзвёздной среде обнаружены разнообразные молекулярные фрагменты, свободные радикалы, напр. C<sub>2</sub>H, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>N, и молекулярные ионы, такие, как SH<sup>+</sup>, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HCO<sup>+</sup>, HOC<sup>+</sup>, HC<sub>2</sub>NH<sup>+</sup>. У многих из найденных М. зарегистрированы их изотопы: замещённые аналоги, содержащие редкие изотопы. Напр., в случае CO обнаружены 6 разл. вариантов М. с <sup>13</sup>C<sub>2</sub> и <sup>17</sup>O<sub>2</sub>. Более того, в многоатомных М. наблюдаются неважносимо М., различающиеся лишь положением неважно-

замещённых атомов, напр. HC<sup>13</sup>C<sup>18</sup>ON, HCC<sup>13</sup>C<sup>18</sup>ON и HCC<sup>13</sup>C<sup>18</sup>N.

Радиоастр. наблюдения молекулярных линий стали осн. источником информации о строении и эволюции Галактики, о физ. условиях, существующих в межзвёздной среде, о хим. и изотопич. составе космич. вещества. Измеряя интенсивности молекулярных линий, их ширины, профили и сдвиги, можно определить состав и массу межзвёздного облака, его плотность и темп-ру, внутр. движение газа, магн. поле, прохождение ультрафиолетовых волн и др.

Исследование М. в межзвёздной среде значительно продвинуло решение таких проблем, как происхождение хим. элементов и изотопов, образование звёзд и протопланетных систем, предбиол. эволюция органич. вещества.

Лит.: Варшавский Д. А. Межзвёздные молекулы, в кн.: Астрофизика и космическая физика, М., 1982; Р у д н и к и Г. М., Молекулы в астрофизике, в кн.: Итоги науки и техники. Исследование космического пространства, т. 20, М., 1983. Д. А. Варшавский.

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ АКУСТИКА** — раздел физ. акустики, в к-ром структура и свойства вещества и кинетика молекулярных процессов исследуются акустич. методами. Осн. методы М. а. — измерения скорости звука и коэф. поглощения звука в зависимости от разл. физ. параметров: частоты звуковой волны, темп-ры, давления, магн. поля и др. величин. Исследования, проводимые такими методами, иногда объединяют в особый раздел эксперим. акустики — ультразвуковую или акустическую спектроскопию. Методами М. а. можно исследовать газы, жидкости, полимеры, твёрдые тела, плазму. На ранней стадии развития этой области и в нек-рых случаях до сих пор термин «М. а.» применяют лишь к исследованиям молекулярной структуры газов и жидкостей.

М. а. как самостоят. раздел акустики возникла в 30-х гг. 20 в., когда было выяснено, что процессы колеб. релаксации (см. Релаксация акустическая) в газах вносят существенный вклад в поглощение звука и приводят к появлению дисперсии звука. В дальнейшем было выяснено, что эти процессы играют важную роль при распространении звука не только в газах, но и в жидкостях и в др. веществах. Изучение релаксационных процессов в звуковой волне позволило связать нек-рые свойства вещества на молекулярном уровне, а также кинетич. характеристики молекулярных процессов с такими макроскопич. величинами, как скорость и коэф. поглощения звука.

Скорость звука с определяется структурой среды и взаимодействием между молекулами, поэтому измерения её величины дают сведения о равновесной структуре жидкостей и газов. По скорости звука можно определить адиабатич. сжимаемость вещества, отношение теплоёмкостей, модули упругости твёрдого тела и др. Данные измерения скорости звука позволяют судить о составе газовых и жидких смесей, в т. ч. и растворов. Данные по поглощению звука позволяют определять коэф. сдвигового и объёмной вязкости, времена релаксации и др. параметры.

В газах по зависимости скорости звука от темп-ры определяют параметры, характеризующие взаимодействие молекул при столкновениях. В жидкостях, вычисл. скорость звука на основании той или иной модели жидкости и сравняв результаты расчёта с экспериментом, в ряде случаев можно оценить правдоподобность используемой модели и определить энергию взаимодействия между молекулами.

При наличии релаксационных процессов энергия поступает, движения молекул в звуковой волне перераспределяется на внутр. степени свободы, при этом появляется дисперсия скорости звука, а зависимость коэф. поглощения от частоты отклоняется от классич. квадратичного закона: коэф. поглощения звука на длину волны имеет максимум на нек-рой частоте  $\omega_0 = 1/\tau$ , наз.

частотой релаксации. Величина дисперсии скорости звука и значение коэф. поглощения на частоте  $\omega_r$  зависят от того, какие именно степени свободы возбуждаются под действием звука, а время релаксации  $\tau$  связано со скоростью обмена энергией между разл. степенями свободы. Измеряя скорость и поглощение звука в зависимости от частоты, можно судить о характере молекулярных процессов и о том, какой из этих процессов вносит осн. вклад в релаксацию. Методы М. а. позволяют исследовать возбуждение колебат. и вращат. степеней свободы в газах и жидкостях, характер столкновений молекул в смеси разл. газов, процесс установления равновесия при хим. реакциях, структурную релаксацию в жидкостях, процессы сдвиговой релаксации в очень вязких жидкостях и полимерах, разл. процессы взаимодействия звука с электрич. проводимост., магнетонами, фононами и др. элементарными возбуждениями в твёрдых телах (см. *Спин-фононное взаимодействие, Акустическое взаимодействие*). Методы М. а. могут использоваться также для исследования кинетики молекулярных процессов в растворах и смесях, в критич. области при фазовых переходах, в расслаивающихся полимерных системах. Эти методы позволяют исследовать свойства стёкол в твёрдом и жидком состоянии, включая область стеклования. В жидкостях с пузырьками газа по характеру зависимости скорости и поглощения от частоты можно определить размеры пузырьков и концентрацию газовой фазы, в биополимерах — характер межмолекулярных взаимодействий и перестройку молекул биополимеров в растворе.

Область релаксации для жидкостей лежит, как правило, в диапазоне более высоких частот, чем для газов. В очень вязких жидкостях, полимерах и нек-рых др. веществах в поглощении и дисперсии может давать вклад целый набор релаксацион. процессов с широким спектром времён релаксации. Изучение влияния темп-ры и давления на частотные зависимости скорости и поглощения звука позволяет разделить вклад разл. релаксацион. процессов.

В М. а. для исследований обычно применяется УЗ- и гиперзвуковые волны в газах — в диапазоне частот  $10^4$ — $10^8$  Гц, а в жидкостях и твёрдых телах — в диапазоне  $10^3$ — $10^{10}$  Гц. Использование оптич. методов, а именно: измерения смещения и ширины компонент *Манделштама — Бриллюэна* рассеяния и определение по ним скорости и коэф. поглощения звука, позволяют расширить диапазон применяемых частот вплоть до десятков Гц.

Методы М. а. могут использоваться также для исследования веществ, в к-рых взаимодействие звука с элементарными возбуждениями не ограничивается простейшими релаксацион. процессами. Напр., исследование поглощения звука в металлах и полупроводниках при разл. темп-рах, магн. полях и др. воздействующих факторах позволяет получить информацию о поведении электронов, о структуре *ферми-поверхностей* и об особенностях электро-фононного взаимодействия. Измерение затухания звука в диэлектриках, напр. в кварце, в зависимости от темп-ры и при разных условиях предварит. обработки позволяет судить о наличии тех или иных примесей или дефектов.

Лит.: Мияха Я. и Яно И. Т., Соловьев В. А., Сыркин Ю. П., *Основы молекулярной акустики*, М., 1964; Физическая акустика, под ред. У. Мизона, пер. с англ., т. 2, Ч. А. М., 1968; т. 4, ч. А — Б, М., 1969—70; т. 5, т. М., 1973—74; Т. А. Кр. Дж., Рэмплтон В., Гиперзвук в физике твёрдого тела, пер. с англ., М., 1975; Крайлик В. А., Крайлик В. В., Введение в физическую акустику, М., 1984.

А. Л. Полякова.

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ МАССА** — значение массы молекулы, выраженное в *атомных единицах массы*. Практически М. м. равна сумме масс входящих в неё атомов (см. *Атомная масса*).

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ОРБИТАЛЬ (МО)** — однопольное состояние отд. электрона молекулы, движущегося

в урядивном поле остальных электронов и в поле её ядрового остова. МО включает пространственную  $\psi(r)$  и спиновую  $\theta(s_z)$  компоненты и часто наз. спин-орбиталью:

$$\Psi(r, s_z) = \psi(r) \cdot \theta(s_z),$$

где  $r$  — вектор, описывающий положение электрона в пространстве,  $s_z$  — значение спина электрона. Каждая МО характеризуется своим ср. значением энергии  $\epsilon_l$  отд. электрона в состоянии с волновой ф-цией  $\psi_l$ . Физ. смысл МО состоит в том, что  $|\psi_l|^2$  описывает пространство. распределение электрона с энергией  $\epsilon_l$ . Полная электронная энергия молекулы равна сумме энергий электронов на всех занятых МО. Первые понятия МО введено Р. Малликемом (R. Mulliken, 1932).

Обозначения МО отличны от обозначений атомных орбиталей; так, для двухатомных и линейных молекул при значениях орбитального квантового числа  $l = 0, 1, 2, \dots$  вводит осн.  $\sigma, \pi, \delta, \dots$  орбитали, а если молекула имеет центр симметрии, то символы осн.  $\sigma, \pi, \delta, \dots$  помечают индексом  $g$  и  $u$  (напр.,  $\sigma_g, \pi_u, \dots$ ). Для нелинейных молекул МО классифицируют по типам симметрии. Напр., МО молекулы  $H_2O$  обозначают с помощью неприводимых представлений группы  $C_{2v}$ :  $a_1, a_2, b_1, b_2$ . Т. к. молекула может иметь неск. МО данного типа, МО обозначают дополнит. коэф. 1, 2, 3, ... указывающими порядок расположения МО по энергиям (МО  $2a_1$  лежит выше, чем  $1a_1$ , и т. д.).

Для нахождения МО применяют один из методов *квантовой химии*. Напр. для двухатомных молекул используется метод Х. Хартри — Фока, к-рый позволяет получать числ. значения МО. В общем случае многоатомных молекул с числом  $N$  атомов в ней для нахождения МО используют приближение, в к-ром каждая МО  $\psi$  представляется в виде линейной комбинации атомных орбиталей  $\chi_{nl}$  (метод МО — ЛКАО) атомов, образующих молекулу, т. е.  $\psi = \sum_{n=1}^N c_n \chi_{nl}$  ( $c_n$  — коэф. МО  $\psi$ ).

МО, найденные методом Хартри — Фока, могут описывать энергетич. состояния молекулы, в к-рых находится электрон (заполненная МО) и в к-рых отсутствует электрон (вакантная МО); для заполненных МО  $\int \psi^* \psi dV = 1$  ( $dV$  — элемент объёма), а для вакантных —  $\int \psi^* \psi dV = 0$ .

Представления о МО используются при интерпретации разл. видов электронных молекулярных спектров. При этом учитывают след. приближённые результаты теории МО: энергия ионизации молекулы при удалении электрона с орбитали  $\phi_i$  есть энергия электрона на этой орбитали —  $\epsilon_i$ ; энергия сроства к электрону при добавлении электрона на вакантную МО  $\phi_a$  есть —  $\epsilon_a$ ; энергия электронного возбуждения, связанная с переходом электрона с заполненной МО  $\phi_i$  на вакантную МО  $\phi_a$ , есть  $\epsilon_a - \epsilon_i$ .

МО используют как нулевое приближение для нахождения точных решений адиабат. нерелятивистского *Шрёдингера уравнения* для молекулы. Корреляц. диаграммы МО реагентов и продуктов хим. реакций используют для предсказания реакционной способности хим. соединений.

Лит. см. при ст. *Молекула, Квантовая химия*.

М. Р. Амос, А. И. Болдырев.

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ РЕФРАКЦИЯ (R)** — связывает электрич. поляризуемость  $\alpha_{cl}$  вещества (см. *Поляризуемость атомов, ионов и молекул*) с его *рефракционным показателем*  $n$ . В пределах применимости выражений для  $n$ ,  $\alpha_{cl}$  характеризуа, как и  $n$ , способностью вещества преломлять свет, отличается от  $n$ , тем, что практически не зависит от плотности, темп-ры и агрегатного состояния вещества.

Осн. ф-ла М. р. имеет вид

$$R = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \pi N_A \alpha_{\text{эл}}, \quad (*)$$

где  $M$  — молекулярная масса вещества,  $\rho$  — его плотность,  $N_A$  — Авогадро постоянная. Ф-ла (\*) является эквивалентом Лоренца — Лоренца формулы (с теми же ограничениями на применимость), но во всех случаях более удобна для практик. приложений. Часто М. р. можно представить как сумму «рефракций» атомов или групп атомов, составляющих молекулу сложного вещества, или их связей в такой молекуле. Напр., М. р. предельного углеводорода  $C_k H_{2k+2}$  равна  $kRC + (2k + 2)RH$  ( $k=1, 2, \dots$ ). Это важное свойство М. р. — аддитивность — позволяет успешно применять рефрактометрич. методы для исследования структуры соединений, определения дипольных моментов молекул, изучения водородных связей, определения состава смесей и для др. физ.-хим. задач.

Лит.: Вольденштейн и М. В. Молекулы и их строение. М., 1955; и о ф-ле В. В. Рефрактометрические методы химии, 3 изд., Л., 1983; см. также лит. при ст. Лоренца — Лоренца формула.

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА** — раздел физики, в к-ром изучаются физ. свойства тел на основе рассмотрения их молекулярного строения. Задачи М. ф. решаются методами физ. статистики, термодинамики и физ. кинетики, они связаны с изучением движения и взаимодействия частиц (атомов, молекул, ионов), составляющих физ. тела.

Первым сформировавшимся разделом М. ф. была кинетич. теория газов. В процессе её развития работами Дж. К. Максвелла (J. K. Maxwell, 1858—60), Л. Больцмана (L. Boltzmann, 1868), Дж. У. Гиббса (J. W. Gibbs, 1871—1902) была создана классич. статистич. физика.

Количеств. представления о взаимодействии молекул (молекулярных силах) начали развиваться в теории капиллярных явлений. Классич. работы в этой области А. К. Клеро (A. C. Clairaut, 1743), П. С. Лапласа (P. S. Laplace, 1806), Т. Юнга (Th. Young, 1805), С. Д. Пуассона (S. D. Poisson), К. Ф. Гаусса (C. F. Gauss, 1830—31), Гиббса (1874—78), И. С. Громеки (1879, 1886) и др. положили начало теории поверхностных явлений. Межмолекулярные взаимодействия были учтены Й. Д. Ван-дер-Ваальсом (J. D. van der Waals, 1873) при объяснении физ. свойств реальных газов и жидкостей.

В нач. 20 в. М. ф. вступила в новый этап развития. В работах Ж. Б. Перрена (J. B. Perrin) и Т. Сведберга (Th. Svedberg, 1906), М. Смолюховского (M. Smoluchowski) и А. Эйнштейна (1904—06), посвящённых броуновскому движению микрочастиц, были получены доказательства реальности существования молекул. Методами рентг. структурного анализа (а впоследствии методами электронографии и нейтронографии) были изучены структура твёрдых тел и жидкостей и её изменения при фазовых переходах и изменении темп-ры, давления и др. характеристик. Учение о межатомах взаимодействиях на основе представлений квантовой механики получило развитие в работах М. Борна (M. Born), Ф. Лондона (F. London) и В. Гайтлера (W. Heitler), а также П. Дебая (P. Debye). Теория переходов из одного агрегатного состояния в другое, наменачная Ван-дер-Ваальсом и У. Томсоном (W. Thomson) и развитая в работах Гиббса (кон. 49 в.), Л. Д. Ландау и М. Фольмера (M. Volmer, 30-е г. 20 в.) и их последователей, превратилась в совр. теорию образования фаз — важный самостоятельный раздел М. ф. Объединение статистич. методов с совр. представлениями о структуре вещества в работах Я. И. Френкеля, Г. Эйринга (H. Eyring, 1935—36), Дж. Д. Бернала (J. D. Bernal) и др. привело к М. ф. жидких и твёрдых тел.

Круг вопросов, охватываемых М. ф., очень широк. В ней рассматриваются: строение веществ и его изменение под влиянием внеш. факторов (давления, темп-ры, электрич. и магн. полей), явления переноса (диффузия,

теплопроводность, вязкость), фазовое равновесие и процессы фазовых переходов (кристаллизация, плавление, испарение, конденсация и др.), критич. состояние вещества, поверхностные явления на границах раздела фаз.

Развитие М. ф. привело к выделению из неё самостоят. разделов: статистич. физики, физ. кинетики, физики твёрдого тела, физ. химии, молекулярной биологии. На основе общих теоретич. представлений М. ф. получили развитие физика металлов, физика полимеров, физика плазмы, кристаллофизика, физико-химия дисперсных систем и поверхностных явлений, теория масел и теплопереноса, физико-хим. механика. При всём различии объектов и методов исследования здесь сохраняется, однако, гл. идея М. ф. — описание макроскопич. свойств вещества на основе микроскопич. (молекулярной) картины его строения.

Лит.: Кикоин А. К., Кикоин И. К., Молекулярная физика. 2 изд., М., 1976; Гринфельд Д. Ж., Кэрри и с. Ч., Берд Р., Молекулярная теория газов и жидкостей, пер. с англ., М., 1981; Френкель Я. И., Кинетическая теория жидкостей, Л., 1975; Дерягин Б. В., Чураев П. В., Мулдашев В. М., Поверхностные силы, М., 1983; П. А. Ребиндер, Б. В. Дерягин, И. В. Чураев. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭПИТАКСИЯ — см. в ст. Эпитаксия.

**МОЛЕКУЛЯРНОЕ ПОЛЕ** — эффектное магн. поле  $H^*$  в магнетике, создаваемое магнитными моментами намагниченного вещества:

$$H^* = \lambda M \quad (1)$$

( $M$  — намагниченность вещества,  $\lambda$  — постоянная М. п.). Соотношение (1) было введено П. Э. Вейсом (P. E. Weiss, 1907) в его теории магнетизма (*ферромагнетизма*); известны также более ранние работы Б. Л. Роизига (1892) в этом направлении.

Введение М. п. соответствует замене парного взаимодействия магн. моментов взаимодействием магн. момента с нек-рым ср. магн. полем, создаваемым остальными моментами. В обобщённом смысле термин  $H^*$  (часто употребляется термин «ср. поле») имеет гораздо более широкое значение и используется во мн. разделах совр. физики как простейшее приближение для описания системы взаимодействующих частиц (см. Среднее поле приближение).

Для получения осн. ур-ния теории М. п. подставляют  $H^*$  в выражение для намагничённости парамагнетика во внеш. магн. поле  $H$ :

$$M = N \mu_B J B_J(z), \quad z = g \mu_B J (H + \lambda M) / kT, \quad (2)$$

где  $J$  — полный момент магн. иона,  $N$  — число магн. ионов,  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $g$  — Ланде множитель,  $B_J(z)$  — ф-ция Бриллюэна (см. Ландеена функция). Ф-ла (2) представляет собой трансцендентное ур-ние для намагничённости  $M$  и имеет нетривиальные решения  $M \neq 0$  при  $T < T_c$ , где  $T_c$  — критич. темп-ра, определяющая Кюри точку ферромагнетика.

Выше точки Кюри ферромагнетик становится парамагнетиком с магн. восприимчивостью  $\chi(T) = M/H$ , где  $M$  соответствует решению ур-ния (2) при  $T \gg T_c$ . Согласно Кюри закону, для парамагнетиков  $\chi = \chi_k = C/T$ , где  $C = N g^2 \mu_B^2 J(J + 1) / 3k$  — постоянная Кюри. В теории М. п.  $\chi_k = \chi_k(H + H^*) = \chi_k(H + \lambda M)$ ,  $M = \chi_k H / (1 - \lambda \chi_k)$ , откуда

$$\chi = M/H = \chi_k / (1 - \lambda \chi_k) = C / (T - \theta). \quad (3)$$

Ф-ла (3) выражает Кюри — Вейса закон — зависимость магн. восприимчивости парамагнетиков от темп-ры в условиях взаимодействия магн. моментов. Здесь  $\theta = \lambda C$  — парамагн. темп-ра Кюри, к-рая, вообще говоря, не совпадает с  $T_c$  из-за отклонений от закона Кюри — Вейса при приближении к  $T_c$ . Величина  $\lambda$  определяется ф-лой

$$\lambda = \theta / C = 3kT_c / [N g^2 \mu_B^2 J(J + 1)]. \quad (4)$$



Оценку величин  $M$  п. можно получить, сравнивая результаты теоретич. расчётов с эксперим. данными. Для Fe ( $T_c \approx 10^3$  K), напр.,  $\lambda \approx 5000$  и  $H^* \approx 5 \cdot 10^8$  Э. Такие большие значения  $\lambda$  и  $H^*$  не могут быть объяснены электродинамик. взаимодействием носителей магн. моментов. Диполь-дипольное взаимодействие моментов даёт значение  $H^* \sim 10^8$  Э, что соответствует  $T_c \sim 10^{-1}$  K.

Природа М. п. оставалась непонятной вплоть до создания *квантовой механики*. В. Гейзенберг (W. Heisenberg, 1928) предположил, что поле  $H^*$  связано с обменной частью эл.-статич. взаимодействия электронов, зависящей от взаимной ориентации их спинов  $S$ :

$$e_{ij} = -2AS_i S_j, \quad (5)$$

где  $e_{ij}$  — энергия взаимодействия,  $A$  — т. н. обменный интеграл. Существование такого взаимодействия является следствием антисимметрии *спиновых функций* электронов, т. е., в конечном счёте, Паули принципа.

В приближении, учитывающем взаимодействие только ближайших  $Z$  соседей в кристаллич. решётке, усреднение по одному из спинов в (5) ( $\bar{S} \sim M$ ) приводит к выражениям

$$\lambda = 2ZA/Ng^2\mu_B^2, \quad T_c = 2ZS(S+1)A/3, \quad (6)$$

что даёт правильный порядок величин  $\lambda$  и  $T_c$  при значениях  $A \sim 10^{-22}$  эрг. В дальнейшем гипотеза Гейзенберга развивалась в большом кол-ве работ в рамках модели локализованных (на узлах решётки) спинов (см. *Гейзенберга модель*).

Учёт обменного взаимодействия в теории М. п. для коллективных электронов в металлах был проведён Э. Стонером (E. C. Stoner, см. *Стонера модель*). Л. Неель (L. Néel, 1932) обобщил теорию М. п. на случай неск. магнитных подрешёток и рассмотрел термодинамику свойства ферримагнетиков и антиферромагнетиков.

Несмотря на грубый характер лежащих в основе теории М. п. приближения, она даёт качественно правильную картину поведения магн. свойств в широком интервале темп-р. Так, вблизи  $T_c$  разделение в ряд по  $x \ll 1$  ур-ния (2) можно получить (при  $H = 0$ ) соотношение:

$$M(T)/M(0) = [3(1 - T/T_c)]^{1/2}, \quad (7)$$

к-рое следует также из теории *фазовых переходов* 2-го рода Ландау. Только сравнительно узкая область *критических явлений* лежит вне рамок теории М. п. Для низких значений  $T$  ( $x \gg 1$ ) теория М. п. даёт  $M \approx M_0[1 - 2 \exp(T/2\theta)]$ , что количественно не согласуется с более точным приближением *спиновых волн*  $M \approx M_0(1 - \beta T^2)$  (*Блоха закон* трёх вторых, где  $M_0$  — макс. значение  $M$  при  $T = 0$ ,  $\beta$  — постоянная для данного  $n$ -на).

Более детальные исследования показывают, что применимость теории М. п. связана с характером взаимодействия между частями — носителями магн. момента. Для дальнедействующих сил теория даёт более хорошие результаты. Так, в модели Гейзенберга поправка к результатам теории М. п. пропорциональна  $1/n$ , где  $n$  — число соседних частиц, взаимодействие с к-рыми ещё достаточно велико.

В совр. теории магнетизма существуют выходящие за рамки теории М. п. методы, позволяющие учитывать корреляцию между спинами. Эти методы привели к ряду новых результатов в термодинамике магн. свойств твёрдых тел. В частности, учёт флуктуаций даёт возможность получить одновременно как закон Кюри — Вейса, так и низкие (иногда меньшие темп-ры Ферми) величины  $T_c$  для *вырожденного газа* электронов в ферромагн. металле, что вывало существенные трудности в теории Стонера.

Несмотря на появление более точных (по соответствию более сложным) методов, теория М. п. продол-

жает оставаться одним из осн. методов расчёта магн. свойств систем взаимодействующих частиц.

Лит.: Т я б л и к о в С. В., Методы квантовой теории магнетизма, 2 изд., М., 1975; К и т т е л ь Ч., Введение в физику твёрдого тела, пер. с англ., М., 1978. Ю. П. Иркин.

**МОЛЕКУЛЯРНОЕ ТЕЧЕНИЕ** (свободномолекулярное течение) — течение разреженного газа, состоящего из молекул, атомов, ионов или электронов, при к-ром свойства потока существенно зависят от беспорядочного движения частиц, в отличие от течений, где газ рассматривается как сплошная среда. М. т. имеет место при полёте тел в верх. слоях атмосферы, в вакуумных системах и др. При М. т. молекулы (или др. частицы) газа участвуют, с одной стороны, в поступат. движении всего газа в целом, а с другой — двигаются хаотически и независимо друг от друга. Причём в любом рассматриваемом объёме молекулы газа могут иметь самые различные скорости. Поэтому основой теоретич. рассмотрения М. т. является *кинетическая теория газов*. Макроскопич. свойства вязкого, сжимаемого, изотропич. течения удовлетворительно описываются простейшей моделью в виде упругих гладких шаров, к-рые подчиняются максвелловскому закону распределения скоростей (см. *Максвелла распределение*). Для описания вязкого, неизоэнтропич. М. т. необходимо пользоваться более сложной моделью молекул и ф-цией распределения, к-рая несколько отличается от ф-ции распределения Максвелла. М. т. исследуются в *динамике разреженных газов*.

Лит.: П а т т е р с о н Г. Н., Молекулярное течение газов, пер. с англ., М., 1960; Аэродинамика разреженных газов, сб. 1, 2, 3, 4, 1953; К о г а н М. П., Динамика разреженного газа, М., 1967.

**МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ МЕТОД** — собираемое название неск. численных методов решения разл. физ. задач при помощи моделирования (имитации) движения атомов, молекул, коллоидных и т. п. частиц, составляющих исследуемую систему. Обычно предполагают известными законы взаимодействия между частицами в рамках классич. механики. Численно интегрируя ур-ния механики, можно проследить за движением частиц и, усредняя по времени и по всем частям, попытаться вывести микро- и макроскопич. характеристики изучаемой системы. При этом обычно исходят из предположения (подлежащего проверке при помощи М. д. м.), что рассматриваемая система является эргодической (см. *Эргодичность*). Реальные модели могут содержать не более неск. млн. частиц; но даже системы, состоящие из неск. десятков или сотен атомов или молекул, представляют интерес. Для описания макроскопич. тел или сред применяют ряд спец. приёмов и методов. М. д. м. особенно полезен при исследовании таких систем (жидкость, плотная плазма и т. д.), в к-рых ор. кинетич. энергии К сравнима с потенци. энергией U. При этом отсутствует малый параметр, позволяющий равнов. напр., теория твёрдых тел ( $K/U \ll 1$  и газов ( $U/K \ll 1$ ). В зависимости от размеров системы и времени наблюдения за её эволюцией, а также с точки зрения изучаемых вопросов (стационарные состояния и термодинамика, неравновесные процессы и физ. кинетика и т. п.) её разновидность М. д. м. представляют собой иерархич. структуру — от численных экспериментов динамик. типа до динамик. *Монте-Карло метода*. В отличие от метода Монте-Карло, разработанного для вычисления равновесных величин, М. д. м. позволяет описать приближение системы к состоянию равновесия. Впервые М. д. м. был использован в работах Б. Олдера (B. Alder) и Т. Вайнрайта (Th. Wainwright) в 1957, а также А. Рахмана (A. Rahman) в 1964.

Численное моделирование в М. д. м. с помощью адекватного метода вычислит. математики численно интегрирует ур-ния движения классич. механики для всех частиц системы при заданных потенциалах межчастичных взаимодействий, внеш. полях, связях, начальных и граничных условиях. В простейшем случае одно-

атомной ван-дер-ваальсовой жидкости решают след. ур-ния:

$$dx_i^{(k)} / dt = p_i^{(k)} / m_i, \quad dp_i^{(k)} / dt = -\partial U / \partial x_i^{(k)}; \quad (1)$$

$$k = 1, 2, 3; \quad i = 1, \dots, N; \quad 0 \leq t \leq t_{\max}$$

$(x_i^{(k)})$  и  $(p_i^{(k)})$  —  $k$ -я координата и импульс  $i$ -й молекулы, а

$$U \equiv U(x_i^{(k)}) = (1/2) \sum_{j \neq i} U_{ij} - \quad (2)$$

потенц. энергия системы  $N$  молекул,  $U_{ij}$  — потенциал взаимодействия  $i$ -й и  $j$ -й молекул, зависящий только от расстояния между ними,  $m_i$  — масса  $i$ -й молекулы,  $t$  — время) с нач. условиями

$$x_i^{(k)}(t=0) = x_{i0}^{(k)}; \quad p_i^{(k)}(t=0) = p_{i0}^{(k)}. \quad (3)$$

Если рассматриваемая система  $N$  частиц является частью макроскопич. изотропной системы, то обычно исходят периодич. граничные условия, т. е. рассматривают  $N$  частиц в ограниченном объеме,  $k$ -рый, периодически повторяясь, заполняет всё пространство. При  $N \geq 3$  и обычно используемых межмолекулярных потенциалах аналитич. решение задачи (1) — (3) невозможно, поэтому вычисляют дискретное отображение фазовой траектории системы через нек-рые, обычно равные промежутки времени  $\Delta t$  (шаг по времени) с помощью численной схемы, связывающей значения координат и импульсов молекул а разл. последовательные моменты времени. Численная схема строится так, чтобы при  $\Delta t \rightarrow 0$  вычисленные отображения сходились к точным решениям.

Чтобы проследить за движением молекул на промежутке времени  $0 \leq t \leq t_{\max}$ , следует задать нач. положения и импульсы частиц (3). По смыслу задачи они обычно не заданы, и их следует выбирать так, чтобы ответ существенно не зависел от привнесённого ими произвола, а средние по времени устанавливались с ростом  $t_{\max}$  по возможности быстрее. Т. о., вариация нач. данных и  $t_{\max}$  — обязательный элемент М. д. м. Однако никаких строгих правил их выбора нет. В задаче подобного типа обычно оказывается достаточной нач. расстановка частиц в виде правильной решётки, т. к. уже через неск. сотен шагов  $\Delta t$  этот порядок полностью исчезает. Если же нач. скорости взять излишне упорядоченными, то могут возникнуть процессы (типа столкновения пучков), сильно затягивающие переход к термодинамич. равновесию, что требует больших  $t_{\max}$ . Поэтому нач. скорости задают случайным образом.

Выбор величины шага  $\Delta t$  основан на неск. соображениях: необходимо, чтобы  $\Delta t$  был на неск. порядков меньше периода колебаний атомов  $\tau_0$ . Более точно  $\Delta t$  подбирают в зависимости от используемой числ. схемы, типа ЭВМ, конкретного вида межмолекулярного потенциала, полной энергии и требуемой точности вычисляемых средних.

Обычно изучают замкнутые системы, в  $k$ -рых полная энергия сохраняется, а темп-ру  $T$  определяют по ср. кинетич. энергии системы:

$$K = t^{-1} \int_0^{t_{\max}} \mathcal{E}_{\text{кин}}(t) dt = 3NkT/2.$$

Даже для небольших  $N$  и «хороших» нач. условий величина  $K$  существует и устанавливается со скоростью  $\sim t^{-1/2}$  характерной для эргодич. систем. Распределение по импульсам оказывается биномиальным (из-за ограниченности полной энергии), т. е. лишь при  $N \rightarrow \infty$  стремится к максвелловскому. Всё это служит основанием для применения понятия темп-ры к системе, подчиняющейся микроканонич. распределению. Введение  $k$ -л. метрики в фазовом пространстве позволяет опре-

делять и энтропию такой системы. Вычисление давления основано на применении *viriala теорема*, требует эргодичности системы и предполагает близость средних по микроканонич. ансамблю к средним по канонич. ансамблю Гиббса, что имеет место при  $N \rightarrow \infty$ .

Такого рода поведение *динамических систем* наз. стохастичностью. Осн. механизм, вызывающий появление стохастичности, — неустойчивость движения, приводящая к расхождению (обычно экспоненциальной) близких фазовых траекторий и явлению перемешивания,  $k$ -рое приводит к эргодичности. В М. д. м.,  $k$ -рый применяют для исследования конденсир. систем, всегда имеет дело с неустойчивостью и стохастичностью. С одной стороны, это оправдывает применение М. д. м. для термодинамич. исследований, а с другой — означает, что точное вычисление траекторий, по-видимому, в принципе невозможно. Однако возможно приближённое вычисление дискретных отображений этих траекторий с наперёд заданной точностью при заданных  $t_{\max}$ .

При разработке конкретного М. д. м. необходимо обратить внимание на то, как алгоритм передаёт нек-рые важные свойства имитируемой динамич. системы, напр. сохранение интегралов движения. Полная энергия консервативной динамич. системы  $\mathcal{E}_{\text{полн}}$  должна сохраняться. Легко построить М. д. м., в  $k$ -рых  $\mathcal{E}_{\text{полн}}$  сохраняется автоматически. Однако обычные алгоритмы интегрирования дифференц. ур-ний приводят к зависимости  $\mathcal{E}_{\text{полн}}(t, \Delta t)$ ,  $k$ -рая служит для грубого контроля за правильностью вычислений. Несохранение  $\mathcal{E}_{\text{полн}}$  свидетельствует либо об ошибке в выборе  $\Delta t$ , либо о непригодности численной схемы. В вестационных задачах М. д. м. этот критерий вообще бесполезен. Если в рассматриваемой системе интегралом движения является импульс, то М. д. м. обычно автоматически сохраняют эту величину, т. к. при вычислении межмолекулярных сил явно используется третий закон Ньютона.

Др. важное свойство траекторий динамич. систем — обратимость во времени — также может быть выполнено автоматически в М. д. м. Т. о., легко убедиться, что в М. д. м. проблемы стохастичности динамич. систем и обратимости ур-ний механики во времени никак не связаны между собой. Описанный метод замкнут, но его основания и результаты можно проверить внутр. образом, в рамках самого этого подхода.

**Другие М. д. м.** Объект исследования М. д. м. — движение всех частиц системы. Во мн. случаях интерес представляет движение лишь нек-рых сортов частиц (напр., в растворах полимеров, в коллоидных растворах). Эту задачу решает разновидность М. д. м. — броуновская (лапжевновская) динамика. Суть этого метода состоит в численном интегрировании системы *Лапжевнена уравнений*, описывающих движение взаимодействующих броуновских частиц и моделирующих взаимодействие броуновских частиц с окружающей средой (напр., с растворителем). Эти ур-ния отличаются от ур-ний Ньютона тем, что их правая часть содержит случайную силу со спектром белого шума и силу трения, пропорциональную скорости частицы. Случайные силы и компоненты тензора трения можно детально изучить с помощью М. д. м., описанного ранее. Т. о., оба М. д. м., применяемые вместе, составляют замкнутый аппарат.

Следующая разновидность М. д. м. основана на изучении динамики  $f$ -ций распределения координат и импульсов, а не отд. частиц. Это динамич. методы Монте-Карло, суть  $k$ -рых состоит в численном интегрировании *кинетических уравнений Больцмана* (Ландау, Власова, Фоккера — Планка, Колмогорова, Смолуховского), основного кинетич. ур-ния, стохастич. ур-ния Льювилля и т. д. Кинетич. коэффициенты и нек-рые важные свойства  $f$ -ций распределения можно получить при помощи описанного выше М. д. м.

**Применения М. д. м.** Большое число работ посвящено изучению жидкости, в частности модели из твёрдых шаров. Удалось обнаружить фазовый переход типа

плавления и получение оценки скорости перемешивания. М. д. м. применяют, в частности, для исследования простых ван-дер-ваальсовых жидкостей. Были определены урнев состояния, бинарные и тернарные фазные распределения, разл. сведения о микроструктуре, коэф. переноса, получено хорошее согласие с экспериментом. Исследованы ван-дер-ваальсовые одноатомные жидкости и газы в тонких слоях и вблизи адсорбирующих стенок. Смоделированы некие фазовые переходы, адсорбция, образование кластеров и т. д. С помощью разл. модификаций М. д. м. исследованы жидкие металлы для выяснения их структурных и динамич. (транспортных) свойств, а также урнев состояний и неких свойств поверхностей металлов. М. д. м. применяют для изучения взаимодействия молекулярных атомных пучков с поверхностями разл. природы и радиац. повреждений твёрдых тел. М. д. м. позволил исследовать динамику отд. полимерных цепей, растворов и расплавов полимеров, его используют также для исследования биополимеров (белков и нуклеиновых к-), воды, водных растворов и адсорбции воды, для описания классич. стадии хим. реакции и коагуляции коллоидов, расчёта вязкости в потоке и др.

Лит.: Вычислительные методы в физике атомных и молекулярных столкновений, пер. с англ., М., 1974; Крокстон К., Физика жидкого состояния, пер. с англ., М., 1978; Федосеев Д. В., Чужиков Р. К., Грицацов А. Г., Гетерогенная кристаллизация из газовой фазы. Вопросы кинетики и численного моделирования, М., 1978; Тагариков А. Н., Сергеев В. М., Метод молекулярной динамики в статистической физике, УФН, 1978, т. 125, с. 409; Моделирование на ЭВМ дефектов в кристаллах, Л., 1978; Берд Г., Молекулярная газовая динамика, пер. с англ., М., 1981; Полюхин В. А., Ухин В. Ф., Дзугутов М. М., Компьютерное моделирование динамики и структуры жидких металлов, М., 1981; Методы Монте-Карло в статистической физике, пер. с англ., М., 1982; Ли и тунг А., Ли и Берман М., Регуляризаторы в стохастической динамике, пер. с англ., М., 1984; Хонин Р., Истуд Д.ж., Численное моделирование методом частиц, пер. с англ., М., 1987.

**МОЛЕКУЛЯРНЫЕ И АТОМНЫЕ ПУЧКИ** — направленные потоки молекул или атомов, движущихся в вакууме практически без столкновений друг с другом и с молекулами остаточных газов. М. и а. п. позволяют изучать свойства отд. частиц, пренебрегая эффектами, обусловленными столкновениями, кроме тех случаев, когда сами столкновения являются объектом исследований. Первый эксперимент с атомным пучком был осуществлён в 1911 Л. Дююае (L. DuBois), к-рый продемонстрировал прямолинейный пролёт в вакууме атомов Na. В дальнейшем экспериментах были продолжены в 1929 О. Штерном (O. Stern), к-рый использовал М. и а. п. для измерения скорости молекул и эфф. сечений их соударений друг с другом, а также для исследования явлений, обусловленных электронными силами и магн. моментами ядер. В 1937 И. Раби (I. Rabi) использовал М. и а. п. в изобретённом им резонансном методе измерения магн. моментов ядер, к-рый в дальнейшем стал одним из осн. методов радиоэлектроскопии, позволивших измерить с большой точностью фундам. характеристики молекул, атомов и атомных ядер [Н. Рамаэй (N. F. Ramsey) и др.].

Источник, в к-ром формируются М. и а. п., представляет собой камеру, соединённую с высоковакуумным объёмом (камера взаимодействия) при помощи отверстия в тонкой стенке (или узкого капилляра в толстой стенке). Исследуемые частицы вводятся в источник в виде газа или пара при давлении неск. мм рт. ст. Для формирования М. и а. п. давление газа в источнике должно быть достаточно малым, чтобы ср. длина  $l$  свободного пробега частиц внутри источника была равна или несколько больше диаметра соединит. отверстия. В этом случае частицы вылетают из источника независимо друг от друга. Для капилляра длина  $l$  должна быть соизмерима также с длиной капилляра. Рост  $l$  за счёт уменьшения давления в источнике уменьшает интенсивность М. и а. п., не улучшая их свойств. Для увеличения интенсивности пучков применяют источники с неск. отверстиями или капиллярами, рас-

стояние между к-рыми должно быть несколько больше их диаметра.

Соударения с частицами остаточного газа разрушают М. и а. п. тем быстрее, чем хуже вакуум. Длина М. и а. п. в идеальном вакууме была бы чрезвычайно велика, т. е. возможны были бы только соударения «лобовые». Для получения в камере взаимодействия предельно достижимого вакуума её отделяют от камеры источника ещё одной — буферной камерой, откачиваемой высоковакуумным насосом. Если давление паров исследуемого вещества при комнатной тем-ре недостаточно велико, его вводят в камеру в форме твёрдых (жидких) образцов и нагревают камеру до тем-ры, обеспечивающей нужное давление.

Взаимодействие частиц. Метод М. и а. п. даёт возможность изучать акт столкновения между двумя частицами в отличие от хим. и газодинамич. методов, в к-рых из-за множеств. столкновений частиц друг с другом наблюдаются лишь усреднённые эффекты. В неких экспериментах измеряются эфф. сечения упругих и неупругих соударений частиц, движущихся под разными углами и с разными скоростями. В др. экспериментах наблюдаются хим. реакции между частицами и изучается угол и энергетич. распределение продуктов реакции [Лестер (Lester), 1971; Дж. Покк (J. S. Ross), 1966; Р. Дж. Гордон (R. J. Gordon) и др., 1971]. Типичный эксперимент 2-го типа показан на рис. 1.

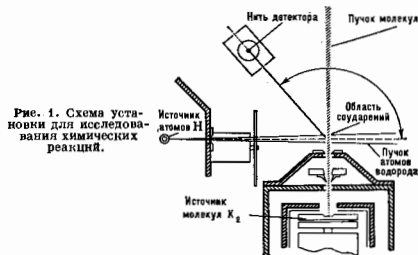


Рис. 1. Схема установки для исследования химической реакции.

Атомы водорода вылетают из источника в камеру, где сталкиваются и вступают в хим. реакцию с двухатомными молекулами щелочного металла, напр.  $K_2$ . Угл. распределение продуктов реакции измеряется с помощью детекторов с поверхностью ионизации (горячие нити Pt и W). Т. к. вольфрамовый детектор одинаково чувствителен к частицам  $K_2$  и KOH, а платиновый — менее чувствителен к KOH, то, комбинируя оба детектора, можно различать эти молекулы. Иногда М. и а. п. предварительно поляризуют или, наоборот, измеряют появляющуюся поляризацию. В неких экспериментах исследуется возмущение колеб. уровней энергии у продуктов реакции.

Резонансные эксперименты (метод Раби). Частицы, вылетающие из источника в вакуум (давление  $p \leq 1,33 \cdot 10^{-10}$  Па или  $10^{-2}$  мм рт. ст.), пролетают через неоднородное магн. поле, создаваемое магнитом А (рис. 2), к-рое по-разному искривляет их траектории в зависимости от взаимодействия их магн. моментов с неоднородным магн. полем и от их скорости. Далее частицы пролетают через однородное магн. поле, создаваемое магнитом С. В этом поле расположена диафрагма, ограничивающая пучок, и устройство, формирующее эл.-магн. поле, частота к-рого  $\omega_p$  может настраиваться на частоту исследуемого энергетич. перехода:

$$\omega = (\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1)/\hbar,$$

где  $\mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}_2$  — энергии частицы в двух состояниях. Неоднородное поле магнита В, противоположное по направлению полю А, по подобию ему по структуре,

разделяет проходящие через него М. и а. п. так, что частицы, испытывая энергию, переход  $\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2$  в эл.-магн. поле, действующем на них в зазоре магнита С, фокусируются на детектор Д и регистрируются, а

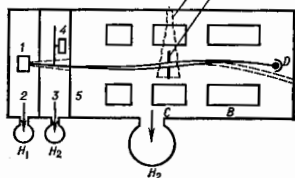


Рис. 2. Схема установки для исследования пучков в радиодиапазоне: 1 — источник пучка; 2 — камера источника; 3 — буферная камера; 4 — прерыватель пучка; 5 — камера взаимодействия; 6 — двухпроводная линия; 7 — диафрагма; Д — детектор пучка. Н<sub>1</sub> — форвакуумный насос, Н<sub>2</sub> и Н<sub>3</sub> — высоковакуумные насосы.

частицы, не испытавшие перехода, отклоняются в стороны и не попадают на детектор. При  $\omega_p = \omega$  интенсивность  $I$ , регистрируемая детектором, имеет максимум. По величине  $\omega$  определяют уровни энергии молекул.

Для детектирования частиц иногда применяют масс-спектрометр, а для увеличения чувствительности обычно используют прерыватель (модулятор) пучка, помещая его в буферной камере установки на пути пучка в гл. камере, при этом сигнал от детектора пропускают через синхронный усилитель. Для увеличения интенсивности сигнала  $I$  вместо двухполосных магнитов А и В применяют шестиполосные.

Если резонансная частота  $\omega$  соответствует радиодиапазону, то эл.-магн. поле в зазоре магнита С возбуждают при помощи двухпроводной линии, закороченной на конце. Открытые концы линии соединяют с генератором. Пучок пропускают сквозь пучность магн. поля стоячей волны на расстоянии  $1/4$  длины волны этого поля от закороченного конца линии.

Для наблюдения переходов, резонансная энергия к-рых лежит в диапазоне СВЧ, вместо двухпроводной линии применяют *объемный резонатор*. М. и а. п. пропускают через отверстия в противоположных стенках резонатора, расположенных так, что частицы пролетают сквозь пучность магн. компоненты СВЧ-поля. Спектральные линии наблюдают периодически, изменяя частоту эл.-магн. поля  $\omega$  по «пилообразному» закону (рис. 3).

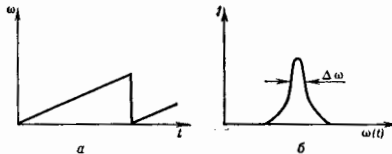


Рис. 3. Кривая модуляции частоты ВЧ-поля и форма спектральной линии: а — напряженность магнитной составляющей поля  $H$  в относительных единицах; б — интенсивность спектральной линии в относительных единицах;  $t$  — время;  $\omega$  — частота;  $\Delta\omega$  — ширина спектральной линии.

Ширина спектральных линий  $\Delta\omega$  определяется временем взаимодействия частиц пучка с эл.-магн. полем, т. е. временем их пролета сквозь пространство, в к-ром действует поле, а также однородностью магн. поля С в области взаимодействия. Очевидно, достижение оптимума по этим параметрам затруднительно, однако

уменьшения  $\Delta\omega$  необходимо для достижения достаточно высокой разрешающей способности установки. Уменьшения  $\Delta\omega$  достиг Н. Рагзой, введя в установку П-образный резонатор (рис. 4). М. и а. п. пропускают

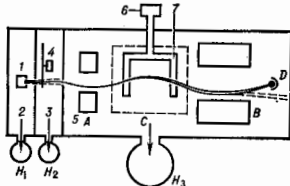


Рис. 4. Схема установки для исследования пучков в диапазоне СВЧ: 1 — источник пучка; 2 — камера источника; 3 — буферная камера; 4 — прерыватель пучка; 5 — камера взаимодействия; 6 — генератор СВЧ; 7 — П-образный резонатор. Н<sub>1</sub> — форвакуумный насос, Н<sub>2</sub> и Н<sub>3</sub> — высоковакуумные насосы.

сквозь пучность магн. поля резонатора через отверстия вблизи его концов, создавая таким образом две раздельные области взаимодействия пучка с эл.-магн. полем. При этом высокая степень однородности поля С должна быть обеспечена только в малых областях взаимодействия. Спектральные линии, наблюдаемые при этом, возникают как результат наложения двух широких спектральных линий, формируемых в областях взаимодействия (рис. 5). Широкий «шестедстал» (пунктир)

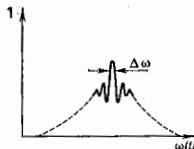


Рис. 5. Спектральная линия в П-образном резонаторе. Интенсивность спектральной линии  $I$  дана в относительных единицах;  $\Delta\omega$  — ширина спектрального пика.

соответствует времени пролета частиц пучка через каждую из областей взаимодействия. Узкие линии в ср. части рисунка возникают в результате равенности фаз поля за время пролета частиц между областями взаимодействия. Ширина центр. пика определяется полным временем пролета частиц через области взаимодействия  $t$  между ними.

Дальнейшего уменьшения  $\Delta\omega$  можно добиться, увеличивая время взаимодействия частиц с эл.-магн. полем, отбором медленных частиц. Однако доля таких частиц в М. и а. п., порожденных источником, находящимся в тепловом равновесии, мала. Эфф. способом уменьшения скорости является сочетание метода М. и а. п. с оптич. ориентацией ядер [А. Кастлер, (A. Kastler), 1950; см. *Ориентированные ядра*]. Возможности комбинир. методов расширились после появления лазеров. Стало возможным получение интенсивных медленных М. и а. п., лазерное охлаждение, исследования спектров единичных атомов и молекул, основанные на взаимодействии М. и а. п. с излучением лазеров, в частности «плеченые» отд. атомов и молекул эл.-магн. полем и их диат. хранение в изолир. состоянии.

Метод паразитического резонанса аналогичен методу магн. резонанса, за исключением того, что изменение траектории частиц обусловлены взаимодействием электрич. моментов молекул с неоднородными электрич. полями, а квантовые переходы между ними вызваны колебаниями электрич. поля в резонаторе. Интенсивность пучка может быть увеличена за счёт использования четырехполосных или шестиполосных электродов, создающих пространство, фокусировку пучка. Применяется также сочетание обоих методов; напр., одност-

ное постоянное электрич. поле используют в экспериментах с магн. резонансом, а одородное магн. поле в опытах с параэлектрич. резонансом [К. Мак-Адан, (K. McAdan), Н. Рамсей и др., 1972].

Эксперименты с магн. и параэлектрич. резонансами в М. и а. п., в т. ч. с применением лазеров, дали большое кол-во информации о строении молекул, атомов и атомных ядер. Этим методом были измерены спины ядер, магн. и электрич. квадрупольные моменты стабильных и радиоакт. ядер (см. *Квадрупольный момент ядра*). В частности, был обнаружен электрич. квадрупольный момент дейтрона, что впервые указало на существование тензорных сил между элементарными частями. Была измерена (с высокой точностью) тонкая структура атомных спектров, в результате чего в экспериментах с атомарным водородом открыт *лямбовский сдвиг*, послуживший источником серии открытий в *квантовой электродинамике*. С. М. и а. п. были осуществлены измерения пост. тонкой структуры и получено пока единств. доказательство существования у ядер электрич. октупольных моментов. Резонансные эксперименты с М. и а. п. позволили измерить вращательные магн. моменты и электрич. дипольные моменты молекул, энергию взаимодействия ядерных магн. моментов с вращательными магн. моментами молекул, зависимость электрич. и магн. свойств от ориентации молекул, определить квадрупольные моменты молекул, энергию межъядерных взаимодействий и т. д. Частота колебаний, соответствующая линиям сверхтонкой структуры магн. резонанса в М. и а. п., является основой для определения секунды в пассивных стандартах частоты (см. *Квантовые стандарты частоты*).

Возможность пространств. фокусировки М. и а. п., содержащих частицы в определенных энергетич. состояниях при помощи неоднородных электрич. или магн. полей, позволила использовать М. и а. п. для накопления частиц в состояниях с более высокой энергией (т. е. для создания *инверсии населенностей*), что необходимо для осуществления мазера. Первый мазер был осуществлен на пучке молекул аммиака (см. *Молекулярный генератор*). Мазер на пучке атомов водорода широко использовался как для исследования атома водорода, так и для создания активного квантового стандарта частоты (см. *Водородный генератор*).

Лит.: Смит К. Ф., Молекулярные пучки, пер. с англ., М., 1959; Кисс Р., Нигген В. В., Atomic and molecular beam spectroscopy, в кн.: *Handbuch der Physik*, hrsg. von S. Flügge, Bd 37, Pt 1, В.—(и. а.), 1959; Рамсей Н., Молекулярные пучки, пер. с англ., М., 1960; English T. C., Zогл J. C., Molecular beam spectroscopy, в кн.: *Methods of experimental physics*, v. 3, pt В, 2 ed., N. Y.—L., 1974; Летохов В. С., Лазерная фотооптическая спектроскопия, М., 1987.

Н. Ф. Рамсей, М. Е. Яботинский.

**МОЛЕКУЛЯРНЫЕ КРИСТАЛЛЫ** — кристаллы, образованные молекулами, связанными силами *межмолекулярного взаимодействия*. Это гл. обр. ван-дер-ваальсовы силы и *водородная связь*. Внутри молекул атомы соединены более прочными ковалентными связями, поэтому плавление, возгонка и полиморфные переходы в М. к. происходят без нарушения целостности молекул.

К М. к. относятся *квазиодномерные соединения* (слоистые) и *квазидвумерные соединения* (печоечные), где слои и цепочки связаны силами Ван-дер-Ваальса. М. к. образуют комплексные и элементорганич. соединения (рис. 1, а, б), бинарные соединения ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $HC$  и др.). В форме М. к. могут существовать нек-рые простые вещества ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , галогены).

Строение М. к. определяется принципом макс. заполнения пространства, симметрией молекулы и их укладки. Укладку определяют ван-дер-ваальсовы силы (энергия связи  $\sim 1-3$  ккал/моль). Макс. заполнение пространства молекулами произвольной формы достигается выделением отд. слоев. Молекулы в слоях могут располагаться параллельными и антипараллельными рядами или «ёлочкой» (рис. 2). При этом обычно достигается координационное число 12 или 14 (реже 8, 10, 16 и др.).

Молекулы располагаются так, чтобы выступы одних молекул (обычно атомы N) входили в углубления или промежутки соседних. Это способствует возникновению в М. к. скользящих плоскостей или винтовых осей (плос-

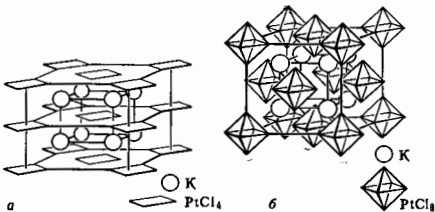


Рис. 1. Структура комплексных соединений, в которых центральный атом Pt образует октаэдрические  $K_2PtCl_6$  (а) и квадратные  $K_2PtCl_4$  (б) комплексы.

кости симметрии встречаются редко, см. *Симметрия кристаллов*). Существуют окред. соотношения между симметрией молекул и М. к.

#### Симметрия молекул и молекулярных кристаллов

Точечная симметрия молекул	1	$\bar{1}$	2	m	mm	mmm	222
Симметрия расположения	...	1	$\bar{1}$ 1;	2	1; m	1; 2; m	$\bar{1}$ 1; 2

Чаще всего М. к. имеют моноклинные, ромбические или триклинную структуру; реже более высокосимметричную — тетрагональную, гексагональную и кубическую.

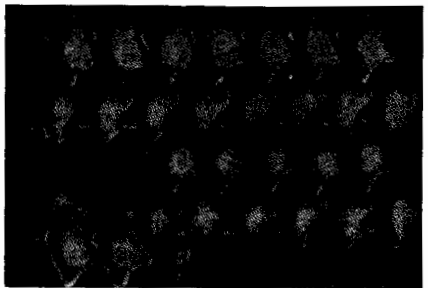


Рис. 2. Укладка слоев органических молекул.

М. к. с водородными связями образуются молекулярными  $H_2O$  (лёд), спиртов, карбоновых к-т, а также большинством молекул биол. происхождения (см. *Биологический кристалл*). Водородная связь — направленная, требующие плотной упаковки молекулы приводит к сближению выступов (Н) одной молекулы с выступами другой (О, N). Отсюда, если молекулы обладают центром симметрии и двойной осью симметрии, то эти же элементы симметрии появляются у М. к. В случае асимметричных молекул в М. к. можно ожидать появления винтовых осей.

Для М. к. характерны низкие темп-ры плавления, большое коэф. теплового расширения и сжимаемость, малая твердость. Большинство М. к. при комнатной темп-ре — *диэлектрики*, но у нек-рых (органич. кристаллы) наблюдаются полупроводниковые свойства.

Лит.: Кита Ягородский А. И., Молекулярные кристаллы, М., 1971; Современная кристаллография, т. 2, М., 1978, гл. 2; Зоркий П. М., Симметрия молекул и кристаллических структур, М., 1986.

В. К. Вайнштейн.

**МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СПЕКТРЫ** — спектры поглощения, испускания или рассеяния, возникающие при квантовых переходах молекул из одного энергетич. состояния в другое. М. с. определяются составом молекулы, её структурой, характером хим. связи и взаимодействием её атомов и молекул. Наиб. характерными получаются М. с. разреженных молекулярных газов, когда отсутствует *уширение спектральных линий* давлением: такой спектр состоит из узких линий с доплеровской шириной.

В соответствии с тремя системами уровней энергии в молекуле — электронной, колебательной и вращательной (рис. 1), М. с. состоят из совокупности электронных, колебат. и вращат.

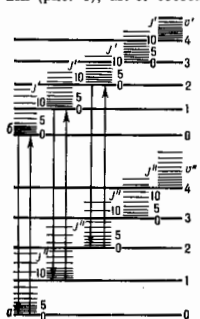


Рис. 1. Схема уровней энергии двуатомной молекулы;  $v$  и  $v'$  — электронные уровни;  $v'$  и  $v''$  — колебательные квантовые числа;  $J'$  и  $J''$  — вращательные квантовые числа.

димум и УФ-области спектра. Это разделение условное, т. к. часто вращат. переходы попадают и в ИК-область, колебат. переходы — в видимую область, а электронные переходы — в ИК-область. Обычно электронные переходы сопровождаются и изменением колебат. энергии молекулы, а при колебат. переходах изменяется и вращат. энергия. Поэтому часто всего электронный спектр представляет собой системы электронно-колебат. полос, причём при высоком разрешении спектральной аппаратуры обнаруживаются их вращат. структура. Интенсивность линий и полос в М. с. определяется вероятностью соответствующего квантового перехода. Наиб. интенсивные линии соответствуют переходу, разрешённому *отбора правилами*. К М. с. относят также оже-спектры и рентг. спектры молекул (в статье не рассматриваются; см. *Оже-эффект, Оже-спектроскопия, Рентгеновские спектры, Рентгеновская спектроскопия*).

**Электронные спектры.** Чисто электронные М. с. возникают при изменении электронной энергии молекул, если при этом не меняются колебат. и вращат. энергия. Электронные М. с. наблюдаются как в поглощении (спектры поглощения), так и в испускании (спектры люминесценции). При электронных переходах обычно изменяется электрон. дипольный момент молекулы. Электр. дипольный переход между электронными состояниями молекулы типа симметрии  $\Gamma'$  и  $\Gamma''$  (см. *Симметрия молекул*) разрешён, если прямое произведение  $\Gamma' \times \Gamma''$  содержит тип симметрии, по крайней мере одной из компонент вектора дипольного момента  $d$ . В спектрах поглощения обычно наблюдаются переходы из основного (полносимметричного) электронного состояния в возбуждённые электронные состояния. Очевидно, что для осуществления такого перехода типы симметрии возбуждённого состояния и дипольного момента должны совпадать. Т. к. электрон. дипольный момент не зависит от спина, то при электронном переходе спин должен сохраняться, т. е. разрешены только переходы между состояниями с одинаковой мультиплетностью (интеркомбинац. запрет). Это правило, однако, нарушается

для молекул с сильным спин-орбитальным взаимодействием, что приводит к *интеркомбинационным квантовым переходам*. В результате таких переходов возникают, напр., спектры фосфоресценции, к-рые соответствуют переходам из возбуждённого триплетного состояния в осн. синглетное состояние.

Молекулы в разл. электронных состояниях часто имеют разную геом. симметрию. В таких случаях условие  $\Gamma' \times \Gamma'' \subset \Gamma_d$  должно выполняться для точечной группы низкосимметричной конфигурации. Однако при использовании переставочно-инверсионной (ПИ) группы такая проблема не возникает, т. к. ПИ группа для всех состояний может быть выбрана одинаковой.

Для линейных молекул симметрии  $C_{2v}$  тип симметрии дипольного момента  $\Gamma_d = \Sigma^+(d_x) + \Pi(d_z, d_y)$ , поэтому для них разрешены только переходы  $\Sigma^+ \rightarrow \Sigma^+$ ,  $\Sigma^- \rightarrow \Sigma^-, \Pi \rightarrow \Pi$  и т. д. с дипольным моментом перехода, направленным по оси молекулы, и переходы  $\Sigma^+ \rightarrow \Pi, \Pi \rightarrow \Delta$  и т. д. с моментом перехода, направленным перпендикулярно оси молекулы (обозначения состояний см. в ст. *Молекулы*).

Вероятность В электрон. дипольного перехода с электронного уровня  $m$  на электронный уровень  $n$ , просуммированная по всем колебательно-вращат. уровням электронного уровня  $m$ , определяется ф-лой:

$$B_{mn} = \frac{8\pi^3}{3h^3c} |M_{mn}|^2, \quad (1)$$

где

$$M_{mn} = \int \psi_n^* d \psi_m d\tau_e = \langle \psi_n | d | \psi_m \rangle - \quad (2)$$

матричный элемент дипольного момента для перехода  $n \rightarrow m$ ,  $\psi_n$  и  $\psi_m$  — волновые ф-ции электронов. Интегральный коэф. поглощения, к-рый можно измерить экспериментально, определяется выражением

$$\int K_{\nu} d\nu = N_m B_{mn} h\nu_{nm} = \frac{8\pi^3}{3hc} N_m \nu_{nm} |M_{mn}|^2, \quad (3)$$

где  $N_m$  — число молекул в нач. состоянии  $m$ ,  $\nu_{nm}$  — частота перехода  $m \rightarrow n$ . Число электронных переходов характеризуются силой осциллятора

$$f_{nm} = \frac{m_e h^2 \nu_{nm}}{2\pi e^2} B_{mn}, \quad (4)$$

где  $e$  и  $m_e$  — заряд и масса электрона. Для интенсивных переходов  $f_{nm} \sim 1$ . Из (1) и (4) определяется ср. время жизни возбуждённого состояния:

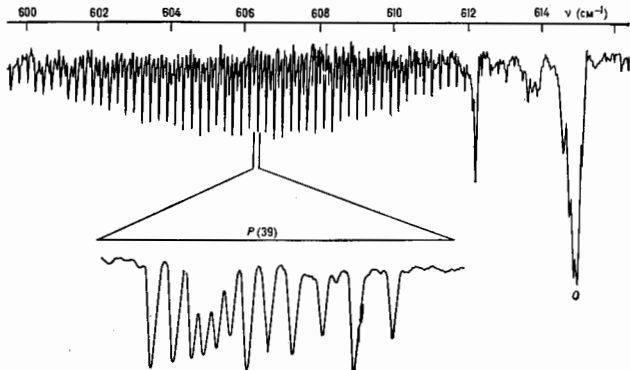
$$\tau_n = \frac{1}{8\pi h c \nu_{nm} B_{mn}}. \quad (5)$$

Эти ф-лы справедливы также и для колебат. и вращат. переходов (в этом случае следует переопределить матричные элементы дипольного момента). Для разрешённых электронных переходов обычно коэф. поглощения на неск. порядков больше, чем для колебат. и вращат. переходов. Иногда коэф. поглощения достигает величин  $\sim 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-1} \text{ атм}^{-1}$ , т. е. электронные полосы наблюдаются при очень низких давлениях ( $\sim 10^{-3} - 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ ) и малых толщинах ( $\sim 10 - 100 \text{ см}$ ) слоя вещества.

**Колебательные спектры** наблюдаются при изменении колебат. энергии (электронная и вращат. энергия при этом не должны меняться). Нормальные колебания молекул обычно представляют как набор независимых гармонич. осцилляторов. Если ограничиться только линейными членами разложения дипольного момента  $d$  (в случае спектров поглощения) или поляризуемости  $\alpha$  (в случае комбинац. рассеяния) по нормальным координатам  $Q_k$ , то разрешёнными колебат. переходами считаются только переходы с изменением одного из квантовых чисел  $\nu_k$  на единицу. Таким переходам соответствует осн. колебат. полосы, они в колебат. спектрах наиб. интенсивны.

Осн. колебат. полосы линейной многоатомной молекулы, соответствующие переходам из осн. колебат. состояния, могут быть двух типов: параллельные ( $\parallel$ ) полосы, соответствующие переходам с дипольным моментом перехода, направленным по оси молекулы, и перпендикулярные ( $\perp$ ) полосы, отвечающие переходам с дипольным моментом перехода, перпендикулярным оси молекулы. Параллельная полоса состоит только из  $R$ - и  $P$ -ветвей, а в перпендикулярной полосе разрешена также и  $Q$ -ветвь (рис. 2). Спектр осн. полос поглощения молекулы типа симметричного волчка также состоит из  $\parallel$  и  $\perp$  полос, но вращат. структура этих полос (см. ниже) более сложная;  $Q$ -ветвь в  $\parallel$  полосе также не разрешена. Разрешённые колебат. полосы обозначают  $\nu_k$ . Интенсивность полосы  $\nu_k$  зависит от квадрата производной  $(\partial d/\partial Q_k)^2$  или  $(\partial \alpha/\partial Q_k)^2$ . Если полоса соответствует переходу на возбуждённое состояние на более высоком, то её наз. горячий.

Рис. 2. ИК-полоса поглощения  $\nu_k$  молекулы  $SF_6$ , полученная на фуре-спектрометре с разрешением  $0,04 \text{ см}^{-1}$ ; ниже показана тонкая структура линии  $P(39)$ , измеренная на диодном лазерном спектрометре с разрешением  $10^{-4} \text{ см}^{-1}$ .



При учёте ангармонизма колебаний и нелинейных членов в разложениях  $d$  и  $\alpha$  по  $Q_k$  становятся вероятными и переходы, запрещённые правилом отбора по  $\nu_k$ . Переходы с изменением одного из чисел  $\nu_k$  на 2, 3, 4 и т. д. наз. обертонами ( $\Delta \nu_k = 2$  — первый обертоном,  $\Delta \nu_k = 3$  — второй обертоном и т. д.). Если при переходе изменяются два или более из чисел  $\nu_k$ , то такой переход наз. комбинационным или суммарным (если все  $\nu_k$  увеличиваются) и разностным (если некоторые из  $\nu_k$  уменьшаются). Обертонные полосы обозначаются  $2\nu_k, 3\nu_k, \dots$  суммарные полосы  $\nu_k + \nu_l, 2\nu_k + \nu_l$  и т. д., а разностные полосы  $\nu_k - \nu_l, 2\nu_k - \nu_l$  и т. д. Интенсивности полос  $2\nu_k, \nu_k + \nu_l$  и  $\nu_k - \nu_l$  зависят от первых и вторых производных  $d$  по  $Q_k$  (или  $\alpha$  по  $Q_k$ ) и кубич. коэффициентов ангармонизма потенц. энергии; интенсивности более высоких переходов зависят от коэфф. более высоких степеней разложения  $d$  (или  $\alpha$ ) и потенц. энергии по  $Q_k$ .

Для молекул, не имеющих элементов симметрии, разрешены все колебат. переходы как при поглощении энергии возбуждения, так и при комбинац. рассеянии света. Для молекул, имеющих центр инверсии (напр.,  $CO_2, C_2H_4$  и др.), переходы, разрешённые в поглощении, запрещены для комбинац. рассеяния, и наоборот (альтернативный запрет). Переход между колебат. уровнями энергии типов симметрии  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  разрешён в поглощении, если прямое произведение  $\Gamma_1 \times \Gamma_2$  содержит тип симметрии дипольного момента, и разрешён в комбинац. рассеянии, если произведение  $\Gamma_1 \times \Gamma_2$  содержит тип симметрии тензора поляризуемости. Это правило отбора приближённое, т. к. оно не учитывает взаимодействия колебат. движения с электронными и вращат. движениями. Учёт этих взаимодействий приводит к возникновению полос, запрещённых согласно чисто колебат. правилам отбора.

Изучение колебат. М. с. позволяет установить гармонич. частоты колебаний, константы ангармонизма. По колебат. спектрам проводится конформан. анализ

(см. Конформации молекулы), изучаются межмолекулярные взаимодействия. Колебат. спектроскопия — эфф. метод качеств. и количеств. спектрального анализа в химии, биологии, медицине.

Вращательные спектры формируются при квантовых переходах между вращат. уровнями энергии молекулы. Их наблюдают обычно в поглощении методами микроволновой спектроскопии, реже в испускании и комбинац. рассеянии. Для двухатомной и линейной мно-

гоатомной молекул вращат. спектры, обусловленные дипольными электр. переходами (изменение вращат. квантового числа  $\Delta J = \pm 1$ ), состоят из линий с частотами

$$\nu = 2B(J+1) - 4D_J(J+1)^2 \quad (6)$$

( $R$ -ветвь;  $B$  — вращательная,  $D_J$  — центробежная постоянные,  $D_J \ll B$ ). Вращат. спектр состоит из почти эквидистантных линий, интервал между  $K$ -рядами примерно равен  $2B$ . Вращат. спектр молекул типа симметричного волчка также прост, в соответствии с правилами отбора для таких молекул  $\Delta J = 0, \pm 1, \Delta K = 0$ , он состоит из линий с частотами

$$\nu = 2B(J+1) - 4D_J(J+1)^2 - 2D_{JK}(J+1)K^2 \quad (7)$$

( $R$ -ветвь). В отличие от спектров линейных молекул каждая  $J$ -линия в этом случае имеет т. к.  $K$ -структуру, соответствующую последнему члену в (7). Напр., для  $NH_3$   $D_{JK} = -45 \text{ МГц}$  и с высокочастотной стороны каждой  $J$ -линии наблюдаются  $K$ -линии, отстоящие от линии с  $K=0$  на  $90(J+1)K^2 \text{ МГц}$ . Правило отбора  $\Delta K = 0$  нарушается при учёте колебательно-вращат. взаимодействия, ангармонизма и жёсткости молекулы.

Вращат. спектры молекул типа симметричного волчка более сложны, т. к. изменения чисел  $K_a, K_c$  при квантовых переходах не ограничены правилами отбора. В отличие от молекул типа симметричного волчка, у  $K$ -рых единств. компонента дипольного момента направлена по оси симметрии, у молекул типа асимметричного волчка все 3 компоненты дипольного момента могут быть отличными от нуля. Переходы, осуществляемые при взаимодействии  $\hat{a}_a, \hat{a}_b, \hat{a}_c$  по осм. инерции  $a, b, c$  с электр. вектором поля излучения, наз. переходами типа « $a$ », « $b$ », « $c$ » соответственно. Эти переходы удовлетворяют след. правилам отбора по числам  $K_a, K_c$  (при условии  $K_a = K_c = J$  или  $J+1$ ): для переходов типа « $a$ »  $\Delta K_a = 0, \pm 2, \pm 4, \dots$ ;  $\Delta K_c = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ ; для переходов типа « $b$ »  $\Delta K_a = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ ;  $\Delta K_c = 0, \pm 2, \pm 4, \dots$ ; для переходов типа « $c$ »  $\Delta K_a = \pm 1, \pm 3, \dots$ ;  $\Delta K_c = \pm 1, \pm 3, \dots$ , а также общим для

всех переходов правилам  $\Delta J = 0, \pm 1$ . Эти правила отбора получают только для жёсткого асимметричного волчка в результате применения  $D_2$ -симметрии; для реальной нежёсткой молекулы они нарушаются.

Для классификации вращат. переходов и соответствующих вращат. спектральных линий используются два способа. В первом указываются значения  $J, K'_a, K'_c$  обоих уровней, причём значения этих чисел для ниж. уровня всегда записываются справа. Напр.,  $1_{10} - 1_{11}$  означает, что  $J' = 1, K'_a = 1, K'_c = 0$  для верхнего и  $J'' = 1, K'_a = 1, K'_c = 1$  для ниж. уровня. Этот способ обозначений обычно используется для молекул типа асимметричных волчков. Для молекулы типа асимметричного волчка переходы с  $\Delta J = -1, 0, +1$  обозначаются лат. буквами  $P, Q, R$  соответственно, а значения  $J$  и  $K$  указываются в скобках, напр. вращат. переход  $P(2, 1)$  (в комбинац. рассеянии разрешены также переходы с  $\Delta J = -2$  и  $+2$ , к-рые обозначаются буквами  $O$  и  $S$ ). При  $\Delta K > 0$  значение  $\Delta K$  указывают (индексом слева вверху) буквами  $o, p, q, r, s$  для  $\Delta K = -2, -1, 0, +1, +2$  соответственно.

Во вращат. спектрах обычно наблюдаются сотни и даже тысячи линий, из частот к-рых с высокой точностью (до 1 КГц) определяются величины вращат. и центробежных констант молекул, к-рые используются при построении потенциальных поверхностей молекул. В случае нежёстких молекул, имеющих неск. равновесных конфигураций, наблюдаются туннельные расщепления вращат. линий, по к-рым определяются высота и форма барьеров на потенц. поверхности.

Колебательная структура электронных спектров. Поверхности потенц. энергии и соответствующие им системы колебат. уровней разл. электронных состояний могут существенно отличаться друг от друга, поэтому колебат. структура электронных переходов подчиняется довольно сложным правилам отбора и электронно-колебат. спектр сильно отличается от чисто колебат. спектра. Тем не менее осн. особенности колебат. структуры поддаются не только качеств., но и количеств. анализу. Теоретич. основой этого анализа является Фрэнк — Кондона принцип, позволяющий предсказывать распределение интенсивностей полос колебат. структур.

Рассмотрим переход между двумя электронными состояниями  $e'$  и  $e''$  двухатомной молекулы, потенц. ф-ции  $V(\hat{h})$  к-рых смещены друг относительно друга (рис. 3). Согласно принципу Фрэнк — Кондона, при колебат. движении атомные ядра наемдляются около поворотных точек (точки  $a$  и  $b$  на кривой  $e''$ ), а между поворотными точками движутся зна-

чеходы на состояния с  $v'' = 1$  на все верх. состояния образают ( $v'' = 1$ )-прогрессию и т. д. В то же время переходы на верх. состояния  $e'v'$  на все ниж. состояния (спускание) на  $v''$ -прогрессиями. В гармонич. приближении для обоих состояний эти прогрессии состоят из равноотстоящих полос с частотами  $\nu_0 + \omega'v'$  для  $v''$ -прогрессии и  $\nu_0 - \omega''v''$  (для  $v''$ -прогрессии). Если частоты колебания  $\omega$  в верх. ( $\omega'$ ) и ниж. ( $\omega''$ ) состояниях отличаются не сильно, то переходы с одинаковыми

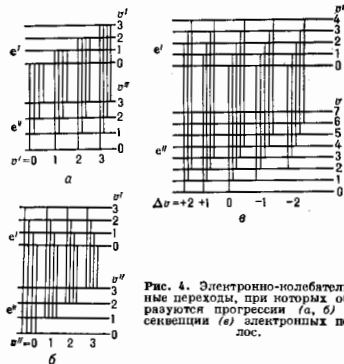


Рис. 4. Электронно-колебательные переходы, при которых образуются прогрессии (а, б) и секвенции (в) электронных полос.

значением  $\Delta v = v' - v''$  дают близкорасположенные полосы, к-рые составляют секвенцию (рис. 4, а).

Обычно частоты (или волновые числа) электронно-колебат. полос записаны в таблицу Деландра, к-рая строится таким образом: строки нумеруют значениями  $v'$ , а столбцы — значениями  $v''$ ; полосы по строке образуют  $v'$ -прогрессию, а полосы по столбцу —  $v''$ -прогрессию. Если объединить клетки этой таблицы, содержащие наиб. интенсивные полосы кривой, то получится некая парабола, симметричная относительно гл. диагонали таблицы; она наз. параболой Кондона. Чем шире парабола Кондона, тем больше отличаются друг от друга потенц. ф-ции верх. и ниж. электронных состояний.

В случае многоатомных молекул при электронном переходе одновременно изменяются квантовые числа неск. колебаний. Поэтому полосы относят к многомерным прогрессиям и секвенциям, т. е. теперь для каждого колебания возможны серии прогрессий, соответствующие разл. значениям квантовых чисел остальных колебаний.

В случае симметричных многоатомных молекул принцип Фрэнк — Кондона ограничивает возможные переходы между колебат. уровнями энергии верх. и ниж. электронных состояний. Согласно этому принципу, не только электронный переход  $e' - e''$  должен быть разрешённым, но и т. н. фактор Фрэнк — Кондона должен быть инвариантным относительно всех операций симметрии молекулы, т. е. колебат. уровни  $v'$  и  $v''$  должны относиться к одному и тому же типу симметрии. В частности, если же молекулы находятся в осн. полносимметричном вибронном состоянии, то в спектре поглощения должны наблюдаться только прогрессии полос полносимметричных колебаний, а полосы всех остальных колебаний будут запрещёнными. Для антисимметричных колебаний  $v_k$  типа  $A_1, E_1, A''$  и т. д. уровни с чётным  $v_k$  полносимметричны, а уровни с нечётным  $v_k$  антисимметричны. Поэтому если переход осуществляется с некого уровня такого колебания, то будут разрешены только полосы секвенций с чётным  $\Delta v_k$  ( $\Delta v_k = 0, \pm 2, \pm 4, \dots$ ).

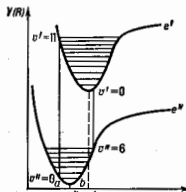


Рис. 3. Схема электронных ( $e'$  и  $e''$ ) и колебательных уровней энергии двухатомной молекулы и образование электронно-колебательных полос ( $R', R''$ ) в соответствии с принципом Фрэнк — Кондона.

чительно быстрее. Электронный переход происходит столь быстро, что за время перехода ядра остаются в тех же поворотных точках, и поэтому наиб. вероятный путь перехода должен быть вертикальным, при этом колебат. квантовое число может измениться, вообще говоря, на любую величину.

Электронно-колебат. система полос двухатомной молекулы состоит из прогрессий и секвенций. Если же молекулы находятся в осн. электронно-колебат. состоянии ( $v'' = 0, v' = 0$ ), то в спектре поглощения могут наблюдаться переходы из этого состояния на все возбужденные состояния  $e'v'$ . Совокупность этих полос наз. ( $v'' = 0$ )-прогрессией (рис. 4, а, б). Аналогично пере-



Эти правила, справедливые только в приближении Франка — Кондона, нарушаются, и многие из запрещённых переходов можно наблюдать. Гл. причина нарушения принципа Франка — Кондона — электронно-колеб. взаимодействие, в результате к-рых приближение Борна — Оппенгеймера становится неприменимым. Кроме того, электронный дипольный момент перехода в этом случае зависит от нормальных координат. Эти обстоятельства приводят к тому, что правило отбора по типам симметрии вибронных уровней становится менее жёстким, а именно: дипольный переход между вибронными состояниями типов симметрии  $\Gamma_{ev}^+$  и  $\Gamma_{ev}^-$  разрешён, если прямое произведение  $\Gamma_{ev}^+ \times \Gamma_{ev}^-$  содержит тип симметрии по крайней мере одной из компонент электр. дипольного момента:

$$\Gamma_{ev}^+ \times \Gamma_{ev}^- \supset \Gamma_d. \quad (8)$$

Это правило можно переформулировать: произведение волновых ф-ций нач. и конечного состояний  $\psi_e^+ \psi_e^-$  может быть неполосимметричным по отношению к тем операциям симметрии, относительно к-рых неполосимметрично произведение  $\psi_e^+ d \psi_e^-$ . Др. словами, запрещённый электронный или вибронный переход может стать активным, если типы симметрии  $\psi_e^+$ ,  $\psi_e^-$  и  $\psi_e^+ d \psi_e^-$  совпадают.

В электронных спектрах молекул часто наблюдаются запрещённые электронно-колеб. полосы. Напр., электронный переход  $B_{2u} - A_{1g}$  в молекуле бензола (точечная группа симметрии  $D_{6h}$ ), запрещённый по чисто электронному правилу отбора  $\Gamma_e \times \Gamma_g \subset \Gamma_d$ , может происходить в соответствии с более точным правилом (8), если возбуждены колебания типов  $b_{1g}$  и  $e_{2g}$ , т. к.  $\psi_e^+ d_e \psi_e^-$  и  $\psi_e^+ d_{e_{2g}} \psi_e^-$  относятся к типам симметрии  $B_{1g}$  и  $E_{2g}$  соответственно. Действительно, в спектре поглощения бензола наблюдается довольно сильная система полос ок. 2600 Å с колеб. структурой, характерной для перехода  $B_{2u} - A_{1g}$ .

Вращательная структура колебательных спектров. В газовой фазе при комнатной темп-ре вращат. уровни энергии молекул заселены в соответствии с *Больцмана распределением*. Поэтому изменение колеб. энергии сопровождается изменением вращат. энергии. Полосы поглощения двухатомных молекул состоят из двух ветвей — R и P, соответствующих переходам с  $\Delta J = +1$ ,  $\Delta J = -1$ ; Q-ветвь ( $\Delta J = 0$ ) запрещена.

Колеб. переходы высокосимметричных молекул часто запрещены по чисто колеб. правилам отбора, но их вращат. структура разрешается вследствие эффектов колебательно-вращат. взаимодействия. Напр., в ИК-спектре поглощения метана ( $CH_4$ ) из четырёх осн. полос  $\nu_1(A_1)$ ,  $\nu_2(E)$ ,  $\nu_3$  и  $\nu_4(F_2)$  в соответствии с колеб. правилами отбора разрешены только полосы  $\nu_3$  и  $\nu_4$ . Коррелированное взаимодействие колебания  $\nu_3$  с колебаниями  $\nu_2$  и  $\nu_4$  приводит к активизации полосы  $\nu_3$ , а эффекты колебательно-вращат. взаимодействия более высокого порядка активизируют и полосу  $\nu_1$ , хотя чисто колеб. полосы  $\nu_1$  и  $\nu_2$  ( $J=0$ ) остаются запрещёнными.

Вращат. структуру колеб. полос обычно исследуют методами *Фурье спектроскопии*, *лазерной спектроскопии*, двойного ИК — МВ-резонанса и др.; эти методы обеспечивают спектральное разрешение  $\sim 10^{-3}$  см<sup>-1</sup> и лучше и позволяют полностью (для лёгких молекул) или частично разрешить структуру полос. Каждый полоса наблюдается в виде сотен и даже тысяч вращат. линий. Существуют эфф. теоретич. методы для моделирования такого большого массива линий. Из частот переходов определяются величины молекулярных параметров, к-рые затем используются при построении потенц. поверхности и при расчёте частот линий в др. участках спектра.

Интенсивность отд. линий полосы и интегральная интенсивность всей полосы несут информацию о строении молекул и используются в молекулярном спектральном анализе. Относит. интенсивность линий используется обычно для идентификации линий. Интегральная интенсивность осн. полосы зависит гл. обр. от первой производной дипольного момента молекулы по данной нормальной координате. Интегральные интенсивности обертонов и составных полос зависят от более высоких производных дипольного момента по нормальным координатам и от коэф. ангармонизма. Кроме того, интенсивности отд. линий вследствие эффектов колебательно-вращат. взаимодействия зависят от определ. комбинаций дипольного момента и его производных. Поэтому измеремые величины интенсивности линий и полос дают ценную информацию о функции дипольного момента.

Помимо дипольных переходов иногда удаётся наблюдать также переходы, обусловленные изменением квадрупольного момента молекулы. Так, дипольные колебательно-вращат. спектры гомоядерных двухатомных молекул строго запрещены, но они имеют квадрупольный момент, при изменении к-рого возникает квадрупольные спектры. Такие спектры наблюдались для молекул  $H_2$ ,  $D_2$ ,  $O_2$  и др.

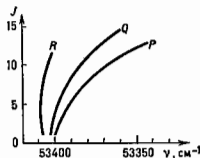
Вращательная структура электронных спектров. Согласно принципу Франка — Кондона, при разрешённом электронном переходе тип симметрии колебат. уровня энергии не меняется, вращат. структура вибронной полосы определяется гл. обр. типом электронного перехода. В частности, вращат. структура электронного перехода  ${}^1\Sigma - {}^1\Sigma$  двухатомной или линейной многоатомной молекулы состоит, как и в случае чисто колеб. спектра, из P- и R-ветвей, соответствующих вращат. переходам с  $\Delta J = -1$  и  $+1$  соответственно. В случае переходов  ${}^2\Sigma - {}^2\Sigma$ ,  ${}^2\Sigma - {}^2\Sigma$  и т. д. J заменяется на N. Если при этом спин-орбитальное взаимодействие невелико, а дублетное, триплетное и т. д. расщепления отсутствуют, то вращат. структура этих переходов будет такая же, как и перехода  ${}^1\Sigma - {}^1\Sigma$ . Все эти переходы связаны с проекцией электр. дипольного момента на ось z и не имеют Q-ветви, т. к.  $K = \Lambda = 0$ . Переходы же с изменением  $\Lambda$  ( $\Pi - \Sigma$ ,  $\Delta - \Pi$  и т. д.) связаны с проекциями  $d_x$  и  $d_y$  (1 переходы) и имеют интенсивные Q-ветви. Эффекты  $\Lambda$ -удвоения, спинового расщепления и др. проявляются в спектре и приводят к расщеплению P-, Q- и R-ветвей на подветви, причём картина расщепления зависит от того, какие взаимодействия преобладают или к какому случаю Хунда (см. *Молекула*) относятся рассматриваемые состояния. Напр., если  ${}^4\Pi$ -состояние относится к случаю «в», то в полосе перехода  ${}^2\Pi - {}^2\Pi$  наблюдается простое удвоение P-, Q-, R-ветвей, а если состояние  ${}^4\Pi$  относится к случаю «а», то эта полоса состоит из двух подполос,  ${}^4\Pi_1$  и  ${}^4\Pi_2$ , —  ${}^2\Sigma$  и  ${}^2\Sigma$ , каждая из к-рых состоит из трёх ветвей.

Т. к. величины молекулярных констант (B, D<sub>J</sub> и т. д.) в разл. электронных состояниях могут сильно отличаться друг от друга, структура P-, Q-, R-ветвей электронных полос может сильно отличаться от структуры этих ветвей в чисто колеб. полосах. Именно этим обусловлена более сильная сходимости линий и образование кантов (резких краёв) полос в электронных спектрах, при  $B' < B''$  образуется VЧ-кант R-ветви (красное оттенение полосы), а при  $B' > B''$  образуется НЧ-кант P-ветви (фиолетовое оттенение полосы). Образование кантов лучше всего иллюстрируется диаграммой Фортра, т. е. зависимостью J от частоты перехода (рис. 5), к-рая оказывается полезной для идентификации отд. линий.

Анализ вращат. структуры вибронных полос нелинейных многоатомных молекул намного сложнее. Практически для каждого типа полос нужно вводить свою модель взаимодействий. Отметим, что если даный вибронный переход запрещён в соответствии с выбранным

ным правилом (8), он может тем не менее наблюдаться за счёт электронно-вращат. взаимодействия. Кроме того, в электронных спектрах молекул часто наблю-

Рис. 5. Диаграмма Фурье для полосы 020—010 электронного перехода  $\Sigma \rightarrow \Pi$  молекулы HCN; точка схождения кривых на оси  $\nu$  называется нулевым полюсом.



даются также и электр.ч. квадрупольные и магн. дипольные переходы.

Лит. см. при ст. Молекула. М. Р. Алевс. **МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЭКСИТОНЫ** — электронные возбуждения (квазиэкситоны) в молекулярных кристаллах, обладающие свойствами Френкеля экситонов. Это означает, что молекулы и в основном, и в возбужденном состоянии сохраняют свою индивидуальность, слабо возмущены *электр.ч. кристаллическим полем* и волновые ф-ции соседних молекул перекрываются слабо. При этом, в отличие от Ванье — Мотта экситона, возбуждение сосредоточено на одной молекуле. Возбужденное состояние молекулы не локализовано и может перемещаться от молекулы к молекуле. Взаимодействие между молекулами приводит к образованию экситонной энергии зон. Сила межмолекулярного взаимодействия определяет ширину экситонной зоны и характерную скорость экситонов. М. э. наблюдаются, напр., в кристалле бензола и более сложных родственных его соединениях. Если в молекулярных кристаллах элементарная ячейка содержит  $n$  (о) молекул, то гамма-зонная электронно-возбужденное состояние кристалла имеет вид [4, 2]:

$$H = \sum_{n, \alpha, m, \beta} M_{n\alpha m\beta} a_{n\alpha}^+ a_{m\beta} \quad (4)$$

Здесь  $a_{n\alpha}^+$  — оператор рождения электронного возбуждения на молекуле, находящейся в элементарной ячейке  $n$  и занимающей в ней позицию  $\alpha$ ;  $M_{n\alpha m\beta}$  — матричные элементы передачи возбуждения между молекулами  $m$  и  $n\alpha$ . Собств. ф-ция гамма-зонная описывает состояние, к-рые представляют собой волны возбуждения:

$$\Psi_k = \sum_{n\alpha} B_{n\alpha}(k) \Psi_{n\alpha} \exp(ikn). \quad (2)$$

Здесь  $k$  — квазиимпульс М. э.; индекс  $\mu = 1, 2, \dots$  принимает  $o$  значений (по числу молекул в элементарной ячейке). Он нумерует экситонные зоны, возникающие на одного внутримолекулярного состояния. Ф-ция  $\Psi_{n\alpha}$  описывает состояние кристалла, в к-ром возбуждена молекула  $n\alpha$ , а остальные молекулы находятся в осн. состоянии. Коэф.  $B_{n\alpha}(k)$  находятся из условия, чтобы  $\Psi_k$  было состоян. ф-цией оператора  $H$ ; это условие определяет энергетич. спектр системы  $\mathcal{E}_\mu(k)$ . Вследствие ограничений, накладываемых симметрией кристалла, в спектре поглощения молекулярных кристаллов переходы возможны только в состоянии с  $k \approx 0$  (закон сохранения квазиимпульса). При этом переходы обычно разрешены не для всех  $\mu$ , а излучение, сопровождающее переходы, поляризовано вдоль кристаллографич. осей. Т. о., из каждого возбужденного (невырожденного) электронного уровня молекулы в кристалле образуется  $o$  экситонных зон, а в его спектре поглощения присутствует экситонный мультиплет, состоящий из  $n$  (о) полюсов, поляризованных по кристаллографич. осям (см. Давыдовское расщепление).

Из внутримолекулярных колебат. возбуждений в кристалле возникает оптич. фоны, к-рые по своим свойствам сходны с электронными экситонами. Их называют колебат. электронными экситонами [3]. Из электроно-колебат. (вибронных) возбуждений молекул возникает т. н. вибронные возбуждения кристалла, имеющие более сложную энергетич. спектр, чем электронные возбуждения. Он содержит связанные состояния электронного и колебат. экситонов и диссоциированные состояния этой пары квазиэкситонов (одночастичные и двухчастичные возбуждения [4]). Взаимодействие М. э. с фонами, отвечающими колебаниям молекул как целого, обычно можно рассматривать как слабое. Однако в ряде кристаллов (напр., в пиррене) наблюдается автокатализация экситонов с образованием акзимеров.

Исследование структуры экситонных зон основано на изучении оптич. спектров экситонов, захваченных на мелкий примесный уровень (см. Газетские силы осциллятора), и вибронных спектров [3, 4]. Обычно осн. состояние молекулы является синглетным, первое возбужденное — триплетным, следующее — снова синглетным. Из синглетных и триплетных молекулярных возбуждений образуются соответственно синглетные и триплетные М. э. Ширина зон синглетных экситонов определяется электр.ч. мультипольными взаимодействиями между молекулами и обычно  $\sim 0,01$ — $0,1$  эВ. Для триплетных М. э. она определяется обменным взаимодействием и обычно  $\sim 10^4$ — $10^9$  эВ. Ламинесценция в случае триплетных экситонов, как правило, связана с предварит. слиянием двух триплетных экситонов в один синглетный. В магн. поле  $H$  скорость этого процесса зависит от  $H$  даже в области слабых полей ( $H \sim 100$  Г [5]). Это явление связано с конкуренцией аземановской энергии и энергии спин-орбитального взаимодействия, последняя мала в молекулах, построенных из атомов лёгких элементов. Триплетные М. э. благодаря наличию электронного спина могут изучаться методами радиоспектроскопии.

Изучение М. э. в изотопно-смешанных молекулярных кристаллах позволяет исследовать свойства неупорядоченных систем, в т. ч. плотность состояний  $g(\epsilon)$ , протекание (см. Протекания теория), прыжковую диффузию и т. д. [4, 6].

Лит.: 1) Давыдов А. С., Теория молекулярных экситонов, М., 1968; 2) Агра и оич В. М., Теория экситонов, М., 1968; 3) Белоусов В. В., Колебательные экситоны Френкеля, в кн.: Экситоны, под ред. Э. И. Рашба, М. Д. Стерджн, М., 1965, с. 334; 4) Броуд В. Л., Рашба Э. И., Шен Е. Ф., Спектроскопия молекулярных экситонов, М., 1981; 5) Соколик И. А., Франкевич Е. Л., Влияние магнитных полей на фотонпроцессы в органических твердых телах, УФН, 1973, т. 111, с. 261; 6) Спектроскопия и динамика возбуждений в конденсированных молекулярных системах, под ред. В. М. Аграновича, Р. М. Хохштаерса, М., 1987.

**МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ГЕНЕРАТОР** — первый квантовый генератор, в к-ром эл.-магн. колебания СВЧ генерировались за счёт вынужденных квантовых переходов молекул  $NH_3$  (см. Квантовая электродинамика). М. г. создан в 1934 Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым и независимым от них Ч. Тауссом (Ch. Townes), Дж. Гордоном (J. Gordon) и Х. Папгером (H. Zeiger). Оба варианта М. г. работали на пучке молекулы аммиака (см. Молекулярные и атомные пучки) и генерировали эл.-магн. колебания с частотой  $\omega = 24\ 840$  МГц ( $\lambda = 1,24$  см).

Молекулы  $NH_3$ , обладающие электр.ч. дипольным моментом, пролетая через неоднородное электр.ч. поле, по-разному отклоняются этим полем в зависимости от их внутр. энергии (см. Штарпа эффект). В первом М. г. сортирующая система представляла собой квадратный конденсатор, состоящий из 4 параллельных стержней спец. формы, соединённых попарно через один с высоковольтным выпрямителем (рис., а). Электр.ч. поле (рис., б) такого конденсатора неоднородно, оно вызывает искривление траекторий молекул, летящих вдоль его продольной оси. Молекулы, находящие-

ся в верх. энергетич. состоянии, отклоняются к оси конденсатора и попадают внутрь объёмного резонатора. Молекулы, находящиеся в ниж. энергетич. состоянии, отбрасываются в стороны. Попада в резонатор, возбуждённые молекулы испускают фотоны под воздействием эл.-магн. поля резонатора. Энергия этих фотонов усиливает поле в резонаторе, увеличивая вероятность вынужденного испускания для молекул, прелетающих позже (о б р а т а н а связь). Если вероятность вынужденного испускания фотона больше, чем вероятность его поглощения в стенках резонатора и излучения за его пределы, то интенсивность эл.-магн. поля резонатора на частоте перехода быстро возрастает за счёт внутр. энергии молекул. Возрастание прекращается, когда поле в резонаторе достигает величин, при к-рой вероятность вынужденного испускания становится столь большой, что за время пролёта резонатора успевают испустить фотон как раз половина молекул пучка. При этом для пучка в целом вероятность поглощения становится равной вероятности вынужденного испускания (н а с ы щ е н и е). Мощность, генерируемая М. г. на лучке молекул  $\text{NH}_3$ , равна  $10^{11}$ . Созданы М. г. и на др. дипольных молекулах, с л в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн. Они служат в качестве радиоспектроскопов высокого разрешения.



Лит.: О р а в с к и й А. Н., Молекулярные генераторы, М., 1964.  
**МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ЛАЗЕР** — лазер, в к-ром активной средой являются молекулярные газы (напр.,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{D}_2$ ), а инверсия населённости осуществляется в системе электронно-уровневой молекул (напр.,  $\text{N}_2$ -лазер) или колебат. уровней (напр.,  $\text{CO}_2$ -лазер, см. Молекулярные спектры). По способу создания инверсии населённости (накачки) в М. л. различают *аэродинамические лазеры* (СО<sub>2</sub>), *газоразрядные лазеры*, в т. ч. *экцимерные лазеры*.  
**МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОРБИТАЛЕЙ МЕТОД** — метод расчёта энергии и определения электронной структуры молекулы. Основан на одноэлектронном приближении, согласно к-рому каждая молекулярная орбиталь описывает состояние электрона в усреднённом поле ядер и всех остальных электронов. Осн. метод *квантовой химии*. См. также *Молекулярная орбиталь*.  
**МОЛИБДЕН** (Molybdenum), Мо, — хим. элемент побочной подгруппы VI группы периодич. системы элементов, ат. номер 42, ат. масса 95,94. В природе представлен 7 стабильными изотопами: <sup>92</sup>Мо (14,84%), <sup>94</sup>Мо (9,25%), <sup>96</sup>Мо (15,92%), <sup>98</sup>Мо (16,68%), <sup>100</sup>Мо (9,55%), <sup>99</sup>Мо (24,13%), <sup>100</sup>Мо (9,63%). Электронная конфигурация дубль вращ. оболочек 4s<sup>2</sup>р<sup>6</sup>d<sup>5</sup>5s<sup>1</sup>. Энергия послед. ряда ионизации равна соответственно 7, 10, 16, 16, 27, 14, 46 и 61 эВ. Металлич. радиус 0,139 нм, радиусы ионов Мо<sup>4+</sup> и Мо<sup>6+</sup> равны соответственно 0,068 и 0,065 нм. Значение электроотрицательности 1,30.  
 М. — светло-серый металл, имеет кубич. объёмно-центрированную структуру с параметром  $a = 0,31466$  нм. Плотность 10,22 г/дм<sup>3</sup>,  $\rho_{20} = 2620$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{жид}}$  по р-ным источникам, 4600—4800 °С. Точка плавления 36 кДж/моль, теплота испарения 552 кДж/моль. Уд. теплоёмкость 272 Дж/(кг·К), теплопроводность при 20 °С 146,6 Вт/(м·К), термич. коэф. линейного расширения (как и лабораторного «молибденового» стекла) равен  $(5,8-6,2) \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>. Уд. электрич. сопротивление  $(5,2-10^2)$  мкОм·м (20 °С) и 0,814 мкОм·м (2620 °С).

М. парамагнитен, магн. восприимчивость  $90 \cdot 10^{-6}$ . При  $T = 0,90-0,98$  К М. переходит в сверхпроводящее состояние.

Механич. свойства М. существенно зависят от чистоты металла и способа его предварит. обработки. Так, тв. по Бриеллю для свечных штабиков 1,5—1,6 ГПа, для кованных прутков 2,0—2,3 ГПа и для отожжённой проволоки 1,4—1,8 ГПа. Предел прочности отожжённой проволоки при растяжении 0,8—1,2 ГПа для монокристаллики. М. — 0,3 ГПа. Модуль упругости 285—300 ГПа.

Стадии окисления М. от +2 до +6 (наиб. характерная). На воздухе при темп-рах св. 400—450 °С окисляется, с парами воды реагирует при темп-рах выше 700 °С.

М. используется в основном в жаропрочных и др. сплавах (темп-ра эксплуатации сплава Мо — Ti достигает 1500 °С). Из М. изготавливают аноды, сетки, катоды, держатели нитей накаливания в лампах. Для измерения высоких темп-р используют термометры Мо — W. М. и MoSi<sub>2</sub> применяют при изготовлении высокотемпературных электр. печей. MoS<sub>2</sub> обладает очень низким коэф. трения и применяется как твердая смазка. Бориды Мо В и Мо<sub>2</sub>В<sub>3</sub> — компоненты керметов — материалов, сочетающих свойства керамики и металлов. Находят применение особенно полученные радионуклиды М. <sup>99</sup>Mo (электронный захват,  $T_{1/2} = 3,5 \cdot 10^3$  лет) и  $\beta$ -радиоактивный <sup>99</sup>Mo ( $T_{1/2} = 66$  ч).  
 С. С. Вердоско.

**МОЛЬ** (моль, mol) — единица СИ кол-ва вещества. В 1 моль содержится столько молекул (атомов, ионов и к.-л. др. структурных элементов вещества), сколько атомов содержится в 0,012 кг <sup>12</sup>C (нуклида углерода с ат. массой 12). См. также *Авогадро постоянная*.

**МОМЕНТ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ** — см. *Вращающийся момент*.  
**МОМЕНТ ИМПУЛЬСА** — то же, что *момент количества движения*.

**МОМЕНТ ИНЕРЦИИ** — величина, характеризующая распределение масс в теле и являющаяся наряду с массой мерой инертности тела при вращении. В механике различают М. и осевые и центробежные. Осевым М. и тела относительно оси z наз. величина, определяемая равенством

$$I_z = \sum m_i h_i^2 \text{ или } I_z = \int \rho h^2 dV, \quad (1)$$

где  $m_i$  — массы точек тела,  $h_i$  — их расстояния от оси z,  $\rho$  — массовая плотность,  $V$  — объём тела. Величина  $I_z$  является мерой инертности тела при его вращении вокруг оси (см. *Вращательное движение*). Осевой М. и можно также выразить через линейную величину  $\rho_z$ , наз. радиусом инерции относительно оси z, по ф-ле  $I_z = M \rho_z^2$ , где  $M$  — масса тела. Размерность М. и —  $I^2 M$ ; единицы измерения — кг·м<sup>2</sup>.

Центробежными М. и относительно системы прямоуг. осей x, y, z, проведённых в точке O, наз. величины, определяемые равенствами

$$I_{xy} = \sum m_i x_i y_i; \quad I_{yz} = \sum m_i y_i z_i; \quad I_{zx} = \sum m_i z_i x_i \quad (2)$$

или соответствующими объёмными интегралами. Эти величины являются характеристиками динамич. неуравновешенности тела. Напр., при вращении тела вокруг оси z от значений  $I_{xz}$  и  $I_{yz}$  зависит сила давления на подшипники, в к-рых закреплена ось.

М. и относительно параллельных осей z и z' связаны соотношением (теорема Гюйгенса)

$$I_z = I_{z'} + M d^2, \quad (3)$$

где z' — ось, проходящая через центр массы тела, d — расстояние между осями.

М. и относительно любой проходящей через начало координат O оси O $\alpha$  с направляющими косинусами  $\alpha, \beta, \gamma$  находится по ф-ле

$$I_{O1} = I_x \alpha^2 + I_y \beta^2 + I_z \gamma^2 - 2I_{xy} \alpha \beta - 2I_{yz} \beta \gamma - 2I_{zx} \alpha \gamma. \quad (4)$$

Зная шесть величин  $I_x, I_y, I_z, I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}$ , можно последовательно, используя ф-лы (4) и (3), вычислить всю совокупность  $M$  и, тела относительно любых осей. Эти шесть величин определяют т. н. тензор инерции тела. Через каждую точку тела можно провести 3 такие взаимно перпендикулярные оси, наз. гл. осями инерции, для к-рых  $I_{xy} = I_{yz} = I_{zx} = 0$ . Тогда  $M$  и тела относительно любой оси можно определить, зная гл. осн инерции и  $M$  и, относительно этих осей.

$M$  и тел сложной конфигурации обычно определяют экспериментально. Понятием о  $M$  п. широко пользуются при решении н.и. задач механики и техники.

Лит.: Гернет М. М., Ратобидский В. Ф., Определение моментов инерции, М., 1968; Фаворин М. В., Моменты инерции тел. Справочник, М., 1970; см. также лит. при *р. Динамика*.

**МОМЕНТ КОЛЛЕЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ** — (кинетический) момент, момент импульса, орбитальный момент, угловой момент) — одна из динамич. характеристик движения материальной точки или механич. системы; играет особенно важную роль при изучении вращат. движение. Как и для момента силы, различают  $M$  к. д. относительно центра (точки) и относительно оси.

$M$  к. д. материальной точки относительно центра  $O$  равен векторному произведению радиуса-вектора  $r$  точки, проведенного из центра  $O$ , на её кол-во движение  $k_0$  т. е.  $k_0 = [rv]$  или в др. обозначениях  $k_0 = r \times mv$ .  $M$  к. д.  $k_2$  материальной точки относительно осн  $z$ , проходящей через центр  $O$ , равен проекция вектора  $k_0$  на эту ось. Для вычисления  $M$  к. д. точки справедливы все ф-лы, приведенные для вычисления момента силы, если в них заменить вектор  $F$  (или его проекции) вектором  $mv$  (или его проекциями). Изменение  $M$  к. д. точки происходит под действием момента  $m_0(F)$  приложенной силы. Характер этого изменения определяется ур-нием  $dk/dt = m_0(F)$ , являющимся следствием осн. закона динамики. Когда  $m_0(F) = 0$ , что, напр., имеет место для центр. сил,  $M$  к. д. точки относительно центра  $O$  остаётся величиной постоянной; точка движется при этом по плоской кривой и её радиус-вектор в любые равные промежутки времени описывает равные площади. Этот результат важен для небесной механики (см. *Кеплера законы*), а также для теории движения космич. летат. аппаратов, ИСЗ и др.

Для механич. системы вводится понятие о главном  $M$  к. д. (или кинетич. моменте) системы относительно центра  $O$ , равном геом. сумме  $M$  к. д. всех точек системы относительно того же центра:  $K_0 = \sum [r_i m_i v_i]$ .

Вектор  $K_0$  может быть определен его проекциями на взаимно перпендикулярные оси  $Ox, y, z$ . Величины  $K_x, K_y, K_z$  являются одновременно главным  $M$  к. д. системы относительно соответствующих осей. Для тела, вращающегося вокруг неподвижной осн  $z$  с угл. скоростью  $\omega$ , эти величины равны:  $K_x = -I_x \omega$ ,  $K_y = -I_y \omega$ ,  $K_z = I_z \omega$ , где  $I_z$  — осевой, а  $I_x$  и  $I_y$  — центробежные моменты инерции. Если же тело движется около неподвижной точки  $O$ , то для него в проекциях на главные осн инерции, проведенные в точке  $O$ , будет  $K_x = I_x \omega_x$ ,  $K_y = I_y \omega_y$ ,  $K_z = I_z \omega_z$ , где  $I_x, I_y, I_z$  — моменты инерции относительно гл. осей;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  — проекция мгновенной угл. скорости  $\omega$  на эти осн. Из ф-л видно, что направление вектора  $K_0$  совпадает с направлением  $\omega$  лишь тогда, когда тело вращается вокруг одной из своих гл. (для точки  $O$ ) осей инерции. В этом случае  $K_0 = I \omega$ , где  $I$  — момент инерции тела относительно этой гл. осн.

Изменение главного  $M$  к. д. системы происходит только в результате веш. воздействий и зависит от гл. момента  $M_0^g$  веш. сил; эта зависимость определяется ур-нием  $dK_0/dt = M_0^g$  (ур-ние моментов). В отличие от случая движения одной точки, ур-ние моментов для системы не является следствием ур-ния кол-

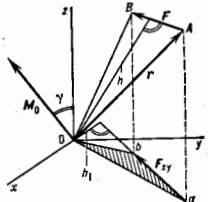
движения, и оба эти ур-ния могут применяться для изучения движения системы одновременно. С помощью одного только ур-ния моментов движение системы (тела) может быть полностью определено лишь в случае чисто вращат. движения (вокруг неподвижной осн или точки). Если гл. момент веш. сил относительно к.-н. центра или осн равен нулю, то главный  $M$  к. д. системы относительно этого центра или осн остаётся величиной постоянной, т. е. имеет место закон сохранения  $M$  к. д. (см. *Сохранения законы*). Появление о главном  $M$  к. д. широко используется в динамике твёрдого тела, особенно в теории гироскопа.

$M$  к. д., так же как и кол-во движения, обладают все формы материи, в т. ч. эл.-магн., гравитат. и др. поля (см. *Поля физические, Спич*).

С. М. Торс.  
**МОМЕНТ ОРБИТАЛЬНЫЙ** — см. *Орбитальный момент*.

**МОМЕНТ СИЛЫ** — величина, характеризующая вращательный эффект силы; имеет размерность произведения длины на силу. Различают момент силы относительно центра (точки) и относительно осн.

$M$  с. относительно центра  $O$  наз. векторная величина  $M_0$ , равная векторному произведению радиуса-вектора  $r$ , проведенного из  $O$  в точку приложения силы  $F$ , на силу  $M_0 = [rF]$  или в др. обозначениях  $M_0 = r \times F$  (рис.). Численно  $M$  с. равен произведению модуля силы на плечо  $h$ , т. е. на длину перпендикуляра, опущенного из  $O$  на линию действия силы, или удвоенной площади треугольника, построенного на центре  $O$  и силе:



$$M_0 = Fh = 2 \text{ пл. } \triangle OAB.$$

Направлен вектор  $M_0$  перпендикулярно плоскости, проходящей через  $O$  и  $F$ . Сторона, куда направляется  $M_0$ , выбирается условно ( $M_0$  — аксиальный вектор). При правой системе координат вектор  $M_0$  направляют в ту сторону, откуда поворот, совершаемый силой, виден против хода часовой стрелки.

$M$  с. относительно осн  $z$  наз. скалярная величина  $M_z$ , равная проекции на ось  $z$  вектора  $M$  с. относительно любого центра  $O$ , взятого на этой осн; величину  $M_z$  можно ещё определять как проекцию на плоскость  $xy$ , перпендикулярную осн  $z$ , площади треугольника  $OAB$  или как момент проекции  $F_{xy}$  силы  $F$  на плоскость  $xy$ , выятый относительно точки пересечения осн  $z$  с этой плоскостью. Т. о.,

$$M_z = M_0 \cos \alpha = \pm 2 \text{ пл. } \triangle Oab = \pm F_{xy} A_1,$$

В двух последних выражениях  $M$  с. считается положительным, когда поворот силы  $F_{xy}$  виден с положит. конца осн  $z$  против хода часовой стрелки (в правой системе координат).  $M$  с. относительно координатных осей  $Ox, y, z$  могут также вычисляться по аналитич. ф-лам:

$$M_x = yF_z - zF_y, \quad M_y = zF_x - xF_z, \quad M_z = xF_y - yF_x,$$

где  $F_x, F_y, F_z$  — проекции силы  $F$  на координатные осн,  $x, y, z$  — координаты точки  $A$  приложения силы. Величины  $M_x, M_y, M_z$  равны проекциям вектора  $M_0$  на координатные осн.

Если система сил имеет равнодействующую, то момент этой равнодействующей относительно любого центра (или осн) равен сумме моментов всех сил системы относительно того же центра (осн) (см. *Вариация теорема*). Понятие о  $M$  с. является одним из осн. понятий механики.

Лит. см. при ст. *Статика*.

С. М. Торс.

**МОМЕНТЫ** случайной величины  $\xi$  — ср. значения её степеней; момент порядка  $n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) для непрерывно распределённой случайной величины с плотностью  $p(x)$  равен

$$M\xi^n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n p(x) dx.$$

Для дискретной случайной величины, принимающей значения  $\{x_k\}$  с вероятностями  $\{p_k\}$ ,  $n$ -й момент равен

$$M\xi^n = \langle \xi^n \rangle = \sum_k x_k^n p_k.$$

Момент 1-го порядка  $M\xi$  — математическое ожидание. Величина  $M(\xi - M\xi)^n$  наз. центральным  $M$ . порядка  $n$ , центральный  $M$ . 2-го порядка наз. дисперсией.

В случае конечного или бесконечного семейства случайных величин  $\{\xi_i, i \in T\}$ , где  $T$  — некоторое множество, помечающее эти величины, с м.с.м.  $n$ -ые моменты (мультимоменты) этого семейства определяются ф-лой

$$M_{n_1, \dots, n_k}(t_1, \dots, t_k) = \langle \xi_1^{n_1} \dots \xi_k^{n_k} \rangle,$$

где  $t_1, \dots, t_k$  — произвольный набор парно различ. точек  $T$ , а  $\{n_1, \dots, n_k\}$  — целочисленный мультииндекс; среднее  $\langle \dots \rangle$  вычисляется по совместному распределению вероятностей значений случайных величин  $\xi_1, \dots, \xi_k$ . Р. А. Мильос.

**МОНОКРИСТАЛЛОВ ВЫРАЩИВАНИЕ** — осуществляют из газовой, жидкой и твёрдой среды (см. Кристаллизация). Выбор метода выращивания определяет область устойчивости вещества, валечием, типом и темп-рой фазовых переходов, хим. свойствами, давлением насыщенного пара и др. Большие, совершенные кристаллы получают, применяя «затравки» и создавая оптим. переохладение (перехохлаждение)  $\sigma$  на поверхности кристаллизации. Наиб. крупные (до 1 м) кристаллы получают из расплава или раствора.

**М. в. из расплава.** На вращающейся затравке переохладение  $\sigma$  создаётся регулируемым теплоотводом от поверхности кристалла и мениска прилегающего к нему расплава (метод Чохральского, рис. 1, а). Вытягиванием через щель на поверхности расплава получают профилированные кристаллы, напр. трубы, пластины (метод Степанова, рис. 1, б). При **М. в.** внутри расплава  $\sigma$  создаётся охлаждением, напр. проточной водой держателя затравки (метод Киропулоса, рис. 1, в). При направленной кристаллизации контактер с расплавом перемещают в горизонтальном или вертикальном направлении из горячей в холодную зону печи, при этом кристаллизация начинают в специальном образом суженной передней части контейнера, что обеспечивает получение монокристаллич. слитка (метод «лодочки», рис. 1, д; метод Стокберга — Бриджмена, рис. 1, е). В т. и. методе гарни с ажа к контейнер может быть сам из кристаллизующегося материала, охлаждаемого снаружи водой, тогда как его внутр. часть плавится токами высокой частоты; **М. в.** проводится «вытягиванием на затравку» или медленным охлаждением. В методе зонной плавки расплавленная зона передвигается от затравки через поликристаллич. слиток. Зонная плавка может проводиться в контейнере или без него (рис. 1, з). В последнем случае мениск расплава удерживается капиллярными силами, а иногда и эл.-магн. «поддержкой». Для тугоплавких веществ используют плавление порошка, сыплющегося в горячую плазму, с оседанием получающихся капель расплава на затравку (метод Вернейля, рис. 1, е). Монокристаллы в виде волокон толщиной 10—200 мкм получают вытягиванием через фильеру либо из капли расплава, образующейся на стержне

(в 1,5—2 раза большей толщины) при нагревании его лазерным лучом (метод «шпестала», рис. 1, ж).

Скорости выращивания из расплава 0,1—1 см/ч. Однородные кристаллы получают из расплава устойчивого хим. соединения. В присутствии примесей для получения однородных кристаллов целесообразно использовать метод вытягивания, обеспечив при выращивании постоянство формы границы раздела фаз.

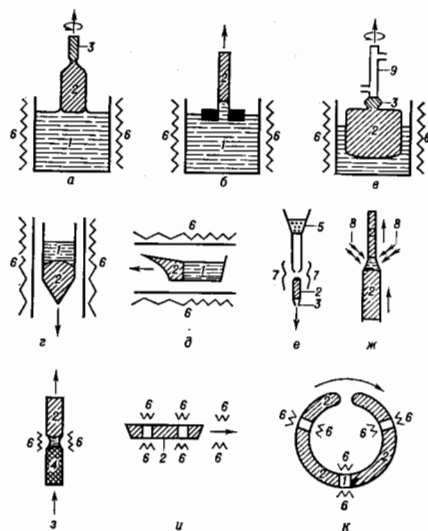


Рис. 1. Выращивание монокристаллов из расплава: а — метод Чохральского; б — метод Степанова; в — метод Киропулоса; г — метод Стокберга — Бриджмена; д — метод «лодочки»; е — метод Вернейля; ж — метод «шпестала»; з — зонная плавка без тигля; и, к — способ зонной плавки; 1 — расплав; 2 — монокристалл; 3 — затравка; 4 — поликристалл; 5 — порошок; 6 — электрический нагреватель; 7 — газовый нагреватель; 8 — лазерное излучение; 9 — охлаждаемый водой держатель затравки.

Гл. усилия при **М. в.** из расплава направляются на управление полем темп-р способом перемешивания расплава (естеств. и принудит. конвекция), контролем атмосферы выращивания.

**М. в. из раствора.** Переохладение создаётся снижением  $T$ , испарением растворителя (рис. 2, а) или «иодиткой» более концентрированным раствором (рис. 2, б). В т. в. методе температурного градиента в аппаратуре создаётся более горячая зона, где вещество растворяется и диффузией или конвекцией переносится к растущему кристаллу (рис. 2, в, г). Гидротермальное выращивание малорастворимых веществ проводят в автоклавах при высоких темп-рах и давлениях. Скорость выращивания 0,1—1 м/сут. Для получения совершенных кристаллов из раствора необходимо, чтобы подвод вещества к растущей поверхности не лимитировал скорости роста. Это достигается, напр., перемешиванием раствора. В таких условиях возможна скорость 1 м/ч и более (скоростное выращивание). Важны очистка сырья, стабилизация  $T$  и  $\sigma$ , создание гидродинамич. течений, обеспечивающих равномерное питание граней.

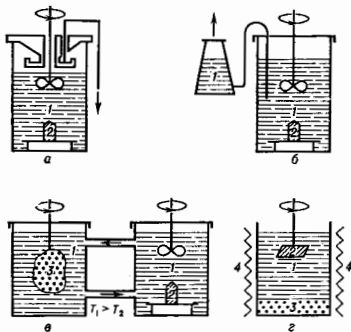


Рис. 2. Выращивание монокристалла из раствора: а — метод испарения растворителя; б — метод «подъёма»; в, г — метод температурного градиента. 1 — раствор; 2 — монокристалл; 3 — порошок; 4 — нагреватель.

М. в. из газовой среды осуществляется возгонкой вещества и его конденсацией на охлаждённую затравку. Используются также хим. реакции (при транспорте вещества к зоне роста, его разложения или синтезе на затравке). Выращивание осуществляется либо в герметич. контейнер, вдоль к-рого создаётся градиент  $T$ , либо в потоке газа. Для получения *нестехиометрических кристаллов* на поверхность затравки наносят капли растворителя, из к-рого кристаллизация идёт быстрее, чем из пара.

При М. в. из поликристаллического образца последний держат при высокой  $T$  для перекристаллизации мелких кристалл. зёрен в крупные (р е к р и з т а л л и з а ц и я). Если вещество имеет полиморфные модификации (см. *Полиморфизм*), то монокристаллы низкотемпературной фазы можно получить, охлаждая кристаллы в определ. температурном поле.

В виде монокристаллов выращивают множество веществ. В наиб. кол-вах производятся Si, Ge (метод Чохральского), кварц (гидротермальный метод), щёлочно-галлоидные соединения (метод Киропулоса), корунд с разл. примесями (методы Вернейля, Чохральского и направленной кристаллизации),  $Y_3Al_5O_{12}$  с примесью Nd (методы Чохральского и направленной кристаллизации), LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub> (метод Чохральского), K(H<sub>2</sub>D<sub>2</sub>)PO<sub>4</sub> (снижение  $T$  и «подпитка»), LiIO<sub>3</sub> (испарение растворителя). Техн. алмаз в виде мелких монокристаллич. зёрен (до 0,2 мм) получают из графита прессованием в небольшом объёме при давлении ок. 4,4 атм и  $T = 1100^\circ\text{C}$ .

Лит.: Вильке К. Т., Методы выращивания кристаллов, пер. с нем., Л., 1968; Современная кристаллография, т. 3, М., 1968. Л. И. Рошников.

**МОНОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ СЛОЙ** (монокатомный слой, монослой) — внеш. слой поверхности конденсированной фазы на её границе с др. фазой или с вакуумом. Понятие М. с. применяется и в тех случаях, когда имеется выраченная поверхность, но нет фазы в термодинамич. понимании (тонкие плёнки, тела биол. природы, мембраны и пр.).

М. с., как правило, является адсорбционным. Адсорб. слой можно считать М. с. тем более строго, чем однороднее по составу и структуре адсорбат и адсорбент. Толщина разл. М. с. колеблется от межмолекулярных расстояний (адсорбция одноатомных молекул на совершенных плотноупакованных гранях монокристаллов) до размеров адсорбиров. макромолекул (до  $\sim 10^2 - 10^4 \text{ \AA}$ ).

Частицы М. с. имеют иное, чем в объёме, атомно-молекулярное окружение, вследствие чего условия равновесия сил, действующих в М. с. и в объёме, различны. Свободная энергия, равновесные расстояния между атомами, концентрация примесей и дефектов, плотность зарядов и т. п. параметры в М. с. отличаются от тех же параметров в объёмной фазе (см. *Поверхностные явления, Поверхность*).

В исследованиях М. с. без использования сверхвысокого вакуума, к-рые проводились до нач. 1960-х гг., установлено, что атомы и молекулы перемещаются в пространстве М. с. из одного локализов. положения в соседнее, если потенци. барьер между атомн. положениями ниже тепловой энергии. Если явные перемещения больше времени нахождения на адсорбц. центрах, то М. с. можно считать двумерным газом, состояние к-рого описывается ур-ниями идеального (либо одной из модификаций реального) двумерного газа; на основе ур-ний состояния двумерного газа получены усреднённые размеры сложных органич. молекул, хорошо согласующиеся с данными, полученными методами *малогоуглового рассеяния* нейтронов и рентг. лучей. При исследовании М. с. в них были обнаружены такие фазовые переходы 1-го и 2-го родов, изучена их кинетика и термодинамика.

С 1960-х гг. началось исследование М. с. с применением сверхвысоковacuумной аппаратуры в условиях вакуумной чистоты, т. е. в хорошо контролируемых и поддерживаемых условиях. Появилась возможность дозированного изменения состава, темп-ры, зарядового состояния и др. параметров М. с. и прецизионного измерения этих величин, выяснена их связь с геом., в частности структурными, характеристиками поверхности. Наиб. удобны для исследования М. с. на чистых поверхностях полупроводников и др. монокристаллов, т. к. в таких М. с. наблюдаются анизотропные явления. Для изучения состава и структуры М. с. применяют зондирование поверхности электронными, нейтронными, ионными, молекулярными, рентг., световыми и позитронными пучками, автономную, автоэлектронную, полевую и тепловую эмиссию частиц с исследуемых поверхностей, а также метод зондовой микроскопии. Большинство исследований должно проводиться в условиях сверхвысокого вакуума, что ограничивало возможности этих методов. Применение зондов-острий позволило снять эти ограничения.

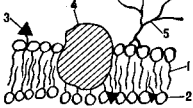
Монослой, образовавшийся на периодических упорядоченных подложках, характеризуется наличием дальнего порядка. Упорядочение структуры М. с. в этом случае названо структурой подложки. Структура М. с. на жидких или аморфных подложках имеет лишь ближний порядок. В М. с. зафиксированы множества поверхностных фаз с концентрационными и температурными фазовыми переходами между ними.

При исследовании работы выхода чистых поверхностей монокристалла и тех же поверхностей с адсорбированным М. с. были обнаружены значит. расхождения этих величин, значительные концентрац. зависимость и анизотропия работы выхода с разл. граней монокристаллов тугоплавких металлов. Так, работа выхода с грани (110) W меняется от 5,35 эВ для чистой поверхности до 4,5 эВ при её покрытии монослоем Cs. Аналогичные эффекты найдены и для др. комбинаций М. с. и подложек. Эти исследования имеют важное значение, в частности для эмиссионной электроники.

М. с. щёлочных и щёлочноземельных элементов на поверхности тугоплавких и переходных металлов обладают большим зарядом. зарядом (приблизительно 1 элементарный заряд на атом); в образованных на тех же поверхностях М. с. молекулами O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, Cl<sub>2</sub> и молекулами др. галогенов имеют заряд примерно в 10 раз меньшей. Неж-рые М. с. образуют сверхструктуры с закономерным чередованием положительно и отрицательно заряженных фрагментов.

К М. с. близко примыкают клеточные мембраны, к-рые представляют собой бислой липидных молекул (рис.). Их гидрофобные остатки жирных к-т (хвосты) обращены навстречу и пропихивают друг друга,

Схема бислоя клеточной мембраны (жидкомозаичная модель): 1 — гидрофобные концы; 2 — гидрофильные головки липидов; 3 — молекулы холестерина; 4 — глобула белка; 5 — моно- и олигосахариды.



а полярные головки остатков фосфорной к-ты, спиртов и углеводов обращены наружу. Вязкость этого жидкокристаллич. образования в 100—1000 раз больше, чем у воды, но глобулярные молекулы белков могут перемещаться вдоль и сквозь мембрану (см. *Клеточные структуры*).

Свойства М. с. определяют явления катализа, роста кристаллов (в частности, эпителиальных пленок), поведение суспензий, эмульсий; М. с. используются в эмиссионной электронике и микроэлектронике.

Лит.: В о л ь ф Э. А. и др., Субмонослойные пленки на поверхности металлов, *УФЧ*, 1971, т. 122, с. 125; А д а м с о н А. У., Физическая химия поверхностей, пер. с англ., М., 1979; К р ы л о в О. В., К и с е л е в В. Ф., Адсорбция и катализ на переходных металлах и их оксидах, М., 1981; К р е п с Е. М., Липиды клеточных мембран, Л., 1981; Ч е р е п и н В. Т., В а с и л ь е в М. А., Методы и приборы для анализа поверхности материалов, Справочник, К., 1982; Физика поверхности: колебательная спектроскопия адсорбатов, под ред. Р. Уиллиса, пер. с англ., М., 1984; А н д о Т., Ф а у л е р А., С т е р н Ф., Электронные свойства твердых систем, пер. с англ., М., 1985; К у м а р, У к р а м а с и я н Г. Х., Растворные микрооскопы с зондами-остриями, «В мире науки», 1989, № 12.

**МОНОГОЛЬ ДИРАКА** — см. *Магнитный моноголь*.  
**МОНОХРОМАТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** (от греч.

μόνος — один и χρώμα, род. падеж χρώματος — цвет) — эл.-магн. излучение одной определённой и строго постоянной частоты. Происхождение термина «М. и.» связано с тем, что различие в частоте с в е т о в ы х волн воспринимается человеком как различие в цвете. Однако по своей природе *электромагнитные волны* видимого диапазона, лежащие в интервале 0,4—0,7 мкм, не отличаются от эл.-магн. волн др. диапазонов (ИК-, УФ-, рентгеновского и т. д.), по отношению к к-рым также используют термин «монокроматический» (одноцветный), хотя никакого ощущения цвета эти волны не дают.

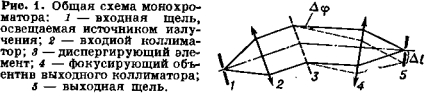
Теория эл.-магн. излучения, основанная на *Максвелла уравнениях*, описывает любое М. и. как гармонич. колебание, происходящее с неизменной амплитудой и частотой в течение бесконечно долгого времени. Плоская монокроматич. волна эл.-магн. излучения служит примером полностью когерентного поля (см. *Когерентность*), параметры к-рого неизменны в любой точке пространства и известны законов их изменения во времени. Однако процессы излучения всегда ограничены во времени, а потому понятие М. и. является идеализацией. Реальное естеств. излучение обычно представляет собой сумму нек-рого числа монокроматич. волн со случайными амплитудами, частотами, фазами, поляризациями и направлениями распространения. Чем уже интервал, к-рому принадлежит частота наблюдаемого излучения, тем оно монокроматичнее. Так, излучение, соответствующее отд. линиям спектров испускания свободных атомов (напр., атомов разреженного газа), очень близко к М. и. (см. *Атомные спектры*); каждая из таких линий соответствует переходу атома из состояния *m* с большей энергией в состояние *n* с меньшей энергией. Если бы энергии этих состояний имели строго фиксиров. значения  $\epsilon_m$  и  $\epsilon_n$ , атом излучал бы М. и. частоты  $\nu_{mn} = (\epsilon_m - \epsilon_n)/h$ . Однако в состояниях с большей энергией атом может находиться лишь малое время  $\Delta t$  (обычно  $10^{-8}$  с — т. н.

*время жизни* на энергетич. уровне), и, согласно *неопределённости соотношению* для энергии и времени жизни квантового состояния ( $\Delta\epsilon \cdot \Delta t \geq h$ ), энергия, напр., состояния *m* может иметь любое значение между  $\epsilon_m + \Delta\epsilon$  и  $\epsilon_m - \Delta\epsilon$ . Поэтому излучение каждой линии спектра соответствует интервалу частот  $\Delta\nu_{mn} = \Delta\epsilon/h = 1/\Delta t$  (подробнее см. в ст. *Ширина спектральной линии*).

Т. к. идеальным М. и. не может быть по своей природе, то обычно монокроматическим считается излучение с узким спектральным интервалом, к-рым можно приближённо характеризовать одной частотой (или длиной волны).

Приборы, с помощью к-рых из реального излучения выделяют узкие спектральные интервалы, наз. *монокроматорами*. Чрезвычайно высокая монокроматичность характерна для излучения нек-рых типов лазеров (ширина спектрального интервала излучения достигает величины  $10^{-7}$  нм, что значительно уже, чем ширина линий атомных спектров).

Лит.: Б о р ь И. В., В о л ь ф Э., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973; К а л и т е в с к и й Н. И., Волновая оптика, 2 изд., М., 1974; Л и т ь к о в с к и й Л. Н., **МОНОХРОМАТОР** — спектральный оптич. прибор для выделения узких участков спектра излучения. М. состоит (рис. 1) из входной щели 1, освещаемой источником излучения, коллиматора 2, диспергирующего элемента 3, фокусирующего объектива 4 и выходной щели 5. Диспергирующий элемент пространственно разделяет лучи разных длин волн  $\lambda$ , направляет их под равными углами  $\varphi$ , и в фокальной плоскости объектива 4 образуется спектр — совокупность изображений входной щели  $\lambda$  в лучах всех длин волн, испускаемых источником. Пучковый участок спектра совмещают с выходной щелью поворотом диспергирующего элемента; изменяя ширину щели 5, изменяют спектральную ширину  $\delta\lambda$  выделенного участка.



Диспергирующими элементами М. служат дисперсионные призмы и дифракц. решётки. Их угл. дисперсия  $D = \Delta\varphi/\Delta\lambda$  вместе с фокусным расстоянием  $f$  объектива 4 определяет линейную дисперсию  $\Delta l/\Delta\lambda = fD$  ( $\Delta\varphi$  — угл. разность направлений лучей, длины волн к-рых отличаются на  $\Delta\lambda$ ;  $\Delta l$  — расстояние в плоскости выходной щели, разделяющее эти лучи). Призмы дешевле решёток в изготовлении и обладают большей дисперсией в УФ-области. Однако их дисперсия существенно уменьшается с ростом  $\lambda$  и для разных областей спектра пучные призмы из разных материалов. Решётки свободны от этих недостатков, имеют постоянную высокую дисперсию во всём оптич. диапазоне и при заданном пределе разрешения позволяют построить М. с существенно большим выходящим световым потоком, чем призмный М.

Оск. характеристиками М., определяющими выбор параметров его оптич. системы, являются: лучистый поток  $\Phi_\lambda$ , проходящий через выходную щель; предел разрешения  $\delta\lambda^*$ , т. е. наим. разность длин волн, ещё различимая в выходном излучении М., либо его разрешающая способность  $r$ , определяемая, как и для любого др. спектрального прибора, отношением  $\lambda/\delta\lambda^*$ , а также оптимальное отверстие объектива коллиматора  $A_0$ . Разрешающая способность  $r$ , ширина выделяемого спектрального интервала  $\delta\lambda$  и спектральное распределение энергии излучения, прошедшего через выходную щель, определяют *аппаратную функцию* М., к-рую можно представить как распределение потока лучистой энергии по ширине изобра-

жения входной щели (в плоскости выходной щели), если та освещается *монотропическим излучением*.

Световой поток, выходящий из  $M$ ,  $\Phi_{\lambda} = \tau_{\lambda} \Phi_{\lambda} = \tau_{\lambda} B_{\lambda} S \Omega \delta \lambda$ , где  $\tau_{\lambda}$  — коэф. пропускания  $M$ ;  $\Phi_{\lambda}$  — световой поток, попадающий в  $M$ ;  $B_{\lambda}$  — спектральная яркость входной щели;  $S$  — площадь выходной щели;  $\Omega$  — телесный угол лучей фокусирующего объектива, сходящихся на выходной щели. Проведение  $S \Omega = S_0 \Omega_0$  (индексы  $0$  относятся к входной щели) при прохождении светового потока через прибор остаётся постоянным (если световые пучки не срезаются к.п. диафрагмами) и наз. геом. фактором прибора. Т. к.  $\Omega = \pi d^2 / 4 f^2 = \pi A^2 / 4$ , где  $f, d$  и  $A$  — фокусное расстояние, диаметр и действующее относительное отверстие фокусирующего объектива, а  $S = hb$  ( $h$  — высота,  $b$  — ширина выходной щели), то  $\Phi_{\lambda} = (\pi/4) A^2 \tau_{\lambda} B_{\lambda} h b \delta \lambda$ .

При определении оптич. условий работы  $M$  существен характер спектра источника света — линейчатый или сплошной, — к-рым освещается входная щель. В первом случае выходящий поток пропорционален ширине выходной щели, во втором случае — квадрату ширины щели  $b^2$ , а также квадрату пропускаемого спектрального диапазона  $(\delta \lambda)^2$ ; при заданном  $\delta \lambda$  выходящий поток пропорционален линейной дисперсии  $M$ . Объективы  $M$  (коллиматорный и фокусирующий) могут быть линзовыми или зеркальными. Зеркальные объективы пригодны в более широком спектральном диапазоне, чем линзовые, и, в отличие от последних, не требуют перефокусировки при переходе от одного выделяемого участка спектра к другому, что особенно удобно для ИК- и УФ-областей спектра.

Из большого кол-ва существующих оптич. схем  $M$  можно выделить, помимо традиционных (рис. 1), автоколлимационные (рис. 2), z-образные (рис. 3), схемы с расположением щелей одна над другой либо просто

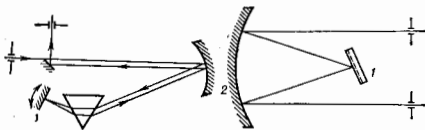


Рис. 2. Автоколлимационная схема: 1 — зеркало, вращением которого осуществляется сканирование спектра.

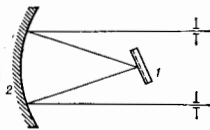


Рис. 3. z-образная симметричная схема: 1 — дифракционная решётка; 2 — сферическое зеркало.

с одной щелью, у к-рой верх. часть служит входной, а нижняя — выходной щелью, и пр. В тех случаях, когда особенно важно избежать попадания в выходную щель  $M$  рассеянного света с длинами волн, далёкими от выделяемого участка спектра (напр., в *спектрофотометрии*), применяют т. н. двойные  $M$ , представляющие собой два  $M$ , расположенных так, что свет, выходящий из первого  $M$ , попадает во второй и выходная щель первого служит входной щелью второго (рис. 4). В зависимости от взаимного расположения диспергирующих элементов в каждом из этих  $M$  различают двойные  $M$ , со сложением и с вычитанием дисперсий. Приборы со сложением позволяют не только во много раз снизить уровень рассеянного света на выходе, но и увеличить разрешающую способность  $M$ , а при заданном разрешении — повысить выходящий световой поток (т. е. расширить щели). Двойные  $M$  с вычитанием дисперсий позволяют снизить уровень рассеянного света без увеличения разрешающей способности. В них на выходную щель приходит свет такого же спектрального состава, с каким он вышел из ср. щели. Такие  $M$  менее светосильны, чем  $M$ , со сложением дисперсий, однако они позволяют проводить сканирование спектра перемещением ср. щели в пло-

скости дисперсии прибора, что очень удобно конструктивно для спектрофотометров, особенно скоростных.

В ряде случаев, когда необходимо одновременное выделение неск. недалёких узких спектральных интер-

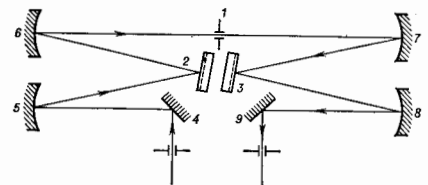


Рис. 4. Двойной монохроматор: 1 — средняя щель; 2 и 3 — дифракционные решётки, вращающиеся на общем основании; 4—9 — зеркала.

валов, применяют простые  $M$  с несколькими выходными щелями, т. н. полихроматоры.

Лит.: Лабораторные оптические приборы, под ред. Л. А. Новичиного, 2 изд., М., 1978; Тарасов К. И., Спектральные приборы, 2 изд., Л., 1977; Пейсаховсон И. В., Оптика спектральных приборов, 2 изд., Л., 1975. А. П. Гагарин.

**МОНТЕ-КАРЛО МЕТОД** (метод статистических испытаний) — численный метод решения разл. задач при помощи моделирования случайных событий. В приложении к физике М.-К. м. можно определить как метод исследования физ. процесса путём создания и засплютации стохастич. модели, отражающей динамику данного процесса.

Если физ. процесс описывается  $k$  величинами (переменными)  $p_1, \dots, p_k$ , к-рые можно рассматривать как случайные величины с плотностью распределения  $F(p_1, \dots, p_k)$ , и требуется оценить плотность распределения нек-рой характеристики  $f$  данного процесса, являющейся ф-цией переменных,  $f = f(p_1, \dots, p_k)$ , или совокупности таких характеристик  $f_1, \dots, f_m$ , то М.-К. м. состоит в следующем. Создается алгоритм, реализуемый в виде программы на ЭВМ или в виде спец. устройства (электронного, механического или др.). Назначение алгоритма — многократно генерировать набор величин  $q_1, \dots, q_k$  с плотностью вероятности  $F$ . Процедуру многократного получения набора  $\{q_j\}$  наз. моделированием физ. процесса; числа  $q_j$  отождествляют с переменными  $p_j$ . Для каждого конкретного набора  $\{q_j^i\}$  вычисляют величину  $f(q_1^i, \dots, q_k^i)$ ; получив достаточно большое число  $N$  наборов  $\{q_j^i\}$ , можно оценить ср. значение величины  $f$ , её дисперсию и поведение ф-ции распределения плотности вероятности. Такой подход наз. прямым методом моделирования. При т. н. косвенном моделировании и процесс описывают одним или неск. ур-ниями (дифференц., интегральными или др.), к-рые решают затем с помощью М.-К. м. С матем. точки зрения обе процедуры эквивалентны вычислению интеграла по нек-рой многомерной области. Кратность вычисляемого интеграла варьируется от 10—20 (в нек-рых задачах физики элементарных частиц) до  $\sim 10^8$  (в расчётах на решётке).

М.-К. м. был сформулирован в 1949 в работах Дж. Неймана (J. Neumann), С. Улама (S. Ulam), Н. Метрополиса (N. Metropolis). Предшественник М.-К. м. — статистическое моделирование, известное ещё в 19 в. Классич. примером такого моделирования является игра Блэфауна, т. е. получение числа  $\lambda$  путём случайного бросания иглы на горизонтальную поверхность, расчерченную сеткой равностоящих параллельных линий. С появлением быстройдействующих компьютеров метод обрёл второе рождение и получил в 1949 назв. метод Монте-Карло.

Техника моделирования. Обычно М.-К. м. реализуют в виде программы на универсальной ЭВМ. Ранее



применялись механич. устройства, ныне всё чаще используют спец. моделирующие устройства с применением микропроцессоров. С помощью таких устройств получают ряд результатов в статистич. физике и квантовой теории поля.

Для реализации случайной величины в М.-К. м. традиционно используют датчики, генерирующие случайную последовательность чисел, равномерно распределённых на интервале (0,1). Различают три типа случайных чисел. Истинно случайные числа можно вырабатывать, напр., преобразуя случайные сигналы от радиоакт. источника или от шумового диода. Таким способом можно достаточно быстро получать большие последовательности некоррелированных случайных чисел. В расчётах на ЭВМ используют псевдослучайные числа, получаемые с помощью нек-рого алгоритма. Назначение такого алгоритма — генерировать числа, к-рые похожи на случайные, хотя, строго говоря, они детерминированы. Необходимы спец. исследования и тесты, чтобы убедиться в достаточной случайности таких чисел (равномерность распределения, отсутствие корреляций и пр.). К в а з и с л у ч а й н ы е ч и с л а также получают при помощи нек-рого алгоритма, причём в основу алгоритма закладывают требование равномерного заполнения точками заданного многомерного объёма. Известен ряд алгоритмов, дающих точки, распределённые в гиперкубе более равномерно, чем случайные и псевдослучайные. Следствием лучшей равномерности является более быстрая сходимость результата.

Использование М.-К. м. в физике базируется гл. обр. на возможности его применения для вычисления интегралов, решения интегральных ур-ний и др. Пусть требуется вычислить интеграл  $\int_{\Omega} f(x) dx$ , где  $\Omega$  — конечная  $k$ -мерная область определения. Алгоритм вычисления в М.-К. м. основан на теореме о среднем:  $\int_{\Omega} f(x) dx = V \langle f \rangle$ , где  $V$  — объём области  $\Omega$ . Выберем  $k$ -мерный параллелепипед с объёмом  $W$ , содержащий область  $\Omega$ , и выберем случайным образом достаточно большое число  $N$  точек, равномерно распределённых в этом параллелепипеде. Для  $M$  точек, попавших при этом в область  $\Omega$ , вычислим значение ф-ции  $f$ . Оценку интеграла даёт величина

$$I = \frac{M}{N} W \cdot \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M f(x_j) = \frac{W}{N} \sum_{j=1}^M f(x_j).$$

Если в области  $\Omega$  точки распределены с плотностью вероятности  $p(x)$ , то, зная объём  $V$ , можно получить след. оценку интеграла:

$$I = \frac{V}{M} \sum_{j=1}^M \frac{f(x_j)}{p(x_j)}$$

Алгоритм решения интегрального ур-ния

$$\varphi(x) = \int_{\Omega} K(x,y)\varphi(y) dy + f(x)$$

М.-К. м. таков. Для достаточно широкого класса ядер  $K(x,y)$  приближённое решение можно искать в виде суммы

$$\varphi_M(x) = \sum_{j=0}^M \psi_j(x),$$

где

$$\psi_0(x) = f(x) \text{ и } \psi_j(x) = \int_{\Omega} K(x,y)\psi_{j-1}(y) dy.$$

Пусть далее нам нужно найти функционал

$$\Phi = \int_{\Omega} \varphi(x)g(x) dx.$$

Построим стохастич. процесс, соблюдая след. правила. Будем многократно строить цепочки из  $M$  случайных

точек. Первая точка  $x_0$  всегда «бросается» в область  $\Omega$  с плотностью вероятности  $f(x)$  (с точностью до нормирующего множителя); переход от точки  $x_{m-1}$  к точке  $x_m$  определяется плотностью вероятности  $K(x_{m-1}, x_m)dx_m$ . Можно показать, что матем. ожидание

случайной величины  $\Phi_M = \sum_{j=0}^M g(x_j)$  равно искомому

функционалу  $\Phi$ . Вообще говоря, можно осуществлять переход  $x_{m-1} \rightarrow x_m$  с произвольной плотностью вероятности  $P(x_{m-1}, x_m)dx_m$ . При этом случайная величина, с помощью к-рой оценивается функционал, вычисляется по ф-ле

$$\Phi_M = g(x_0) + \sum_{j=1}^M g(x_j) \frac{\prod_{i=1}^j K(x_{i-1}, x_i)}{\prod_{i=1}^j P(x_{i-1}, x_i)}.$$

При моделировании физ. процесса важно выбрать оптим. ф-цию  $p(x)$  (или  $P(x_{m-1}, x_m)$ ). Развитие методов, позволяющих правильно выбрать эти ф-ции, посвящено большому числу работ, связанных с вопросом ускорения сходимости. Перспективным является, напр., адаптивный метод, при к-ром ф-ция  $p(x)$  «настраивается» в процессе моделирования на данную подынтегральную ф-цию  $f(x)$ .

Применения М.-К. м. в нейтронной физике осп. задачами являются моделирование прохождения потока нейтронов в среде, расчёт коэф. размножения нейтронов в ядерной реакторе, расчёт защиты реактора и др. Используют как прямое, так и косвенное моделирование. В первом случае в объёме реактора моделируют набор нек-рого числа нейтронов с заданными скоростями (первое поколение). Для каждого нейтрона прослеживают его судьбу (поглощение, вылет из реактора, деление). Образовавшиеся в результате деления нейтроны — это второе поколение, судьбу к-рых прослеживают аналогично. После моделирования достаточно большого числа поколений можно оценить критичность режима реактора. Метод удобен тем, что позволяет учитывать любую геом. форму реактора, наличие неоднородных примесей и пр. Однако время расчётов может быть существенно больше, чем при косвенном моделировании, когда движение нейтронов описывают интегральным ур-нием переноса. Для решения ур-ния составляют цепь Маркова. Характеристики поведения системы (в т. ч. и коэф. размножения) являются функционалами от состояний этой цепи и могут быть оценены стандартными методами.

В физике элементарных частиц одним из первых применений М.-К. м. было моделирование электронно-фотонных ливней. Успех метода в приложениях к этой задаче определяется тем, что классич. описание процесса, хотя и не представляет принципиальных трудностей, практически бесполезно из-за чрезмерно большого числа переменных. Решение проблемы с помощью М.-К. м. сводится к последоват. моделированию судьбы каждой частицы (гамма-кванта, электрона или позитрона), участвующей в процессе, и моделированию соответств. элементарного акта взаимодействия. При этом возникают параметры вторичных частиц, судьбу к-рых прослеживают аналогично. Имеется ряд прикладных программ, работающих по этому принципу, однако для сверхвысоких энергий (~1 ТаэВ) прослеживание всех частиц ливня требует неряльно большого машинного времени.

М.-К. м. используется также при анализе данных, полученных в экспериментах с элементарными частицами. В результате взаимодействия двух частиц образуются ряд вторичных частиц; нек-рые из них нестабильны и распадаются, образуя новые частицы. Весь каскадный процесс описывается совокупностью  $k$  пе-

ременных  $P_1, \dots, P_k$ . Плотность распределения этих переменных определяется теорией или моделью, используемой для интерпретации данной реакции. Соответств. ф-ла может включать ряд неизвестных параметров  $h_1, \dots, h_m$ , для определения  $k$ -рых проводят физ. эксперимент. Т. о., полную плотность вероятности можно записать в виде  $F(P_1, \dots, P_k; h_1, \dots, h_m)$ . С помощью физ. установки (детектора) регистрируют все или некоторые из частей, участвующих в реакции. В каждой конкретной реакции измеряют некие величины  $u_1, \dots, u_n$ , являющиеся ф-циями тех же переменных  $P_i$  и параметров  $h_j$ . Зарегистрировав достаточно большое число событий, можно экспериментально оценить плотность вероятности величин  $u_j$ :  $p(u_1, \dots, u_n)$  и путём сопоставления этой ф-ции с теоретически предсказываемой определить параметры  $h_j$ . Обычно для этого применяют *наименьших квадратов метод* или (в более общем случае) *максимального правдоподобия метод*. При использовании конкретной физ. методики (фотоулавлиания, пузырьковая камера, спектрометр с искровыми, пропорциональными или дрейфовыми камерами) непосредств. результатом эксперимента является проявление ф-ции  $r$  на т. и. приборную ф-цию или эффективность  $\epsilon(r_1, \dots, r_k)$ . Очевидно, что при анализе соответств. распределений необходимо учитывать искажения, вносимые детектором. Общепринятым методом расчёта эффективностей  $\epsilon$  является М.-К. м.

Моделирование взаимодействий и процесса прохождение вторичных частиц через детектор даёт возможность определять геом. эффективность детектора, т. е. долю регистрируемых событий от их полного числа. Имитация траекторий или сигналов в детекторах (цифровых, черенковских и др.) позволяет производить обратную реконструкцию моделей, событий и сравнивать найденные т. о. кинематич. характеристики с истинными. С помощью такой процедуры определяют разрешающую способность детектора.

В квантовой теории поля М.-К. м. интенсивно используют для расчётов в калибровочных теориях на решётке. Наиб. эффективно применение этого метода к тем явлениям в *квантовой хромодинамике* (КХД),  $k$ -рые обусловлены взаимодействием кварков на сравнительно больших расстояниях. Как известно, в КХД с увеличением расстояния растёт и эфф. константа связи, что делает невозможным применение теории возмущений. Одним из осн. средств исследования в т. н. непertурбативной области КХД стал метод численного расчёта на четырёхмерной решётке. В таком подходе используют формулировку КХД с помощью функциональных интегралов, при этом средние по квантовым флуктуирующим полям в каждой точке пространства-времени представлены в виде интегралов. Эти интегралы вычисляют с применением М.-К. м. Точность расчётов улучшается с увеличением размера решётки, однако при этом существенно растёт время, затрачиваемое на вычисления. Даже наиб. мощные ЭВМ способны обеспечить проведение расчётов на решётках лишь сравнительно небольшого размера. Качество скачок в этом направлении возможен при использовании спец. счётных устройств, включающих большое кол-во автономных микропроцессоров. Наиб. интересные результаты: вычисление спектра масс чисто глюонных частиц (глюболов), оценка темп-ры фазового перехода адронной материи в кварк-глюонную плазму и расчёт потенциала взаимодействия в больших расстояниях. Учёт кварков при расчётах на решётке даёт возможность вычислить спектр масс адронов, т. е. почти всех элементарных частиц. Сделанные до сих пор оценки имеют не очень высокую точность.

В статистич. физике использование М.-К. м. имеет свою специфику и тесно переплетается с др. численным методом — *молекулярной динамикой* методом. Одно из направлений в этой области — исследование физики жидкости. Традиц. модель, приме-

няемая для описания жидкости, — система твёрдых сфер либо твёрдых дисков. Обычно исследуют модель, содержащую от неск. десятков до тысячи таких сфер. Варьируя конкретный вид взаимодействия между этими объектами, можно моделировать поведение таких сред, как классич. жидкость, элктронный, раствор или жидкий металл. Методика моделирования плазмы различна для разл. плотности элктронов. При высокой плотности (характерной, напр., для белых карликов) элктронный газ вырожден и рассматривается как неподвижная среда, в  $k$ -рой движутся ионы (однокомпонентная плазма). При меньшей плотности необходимо учитывать поляризацию элктронного фона и эффекты экранирования. Поведение такой плазмы исследуют, напр., с помощью модели заряд. твёрдых сфер, движущихся в однородном фоне. М.-К. м. (наряду с *молекулярной динамикой методом*) применяют также для изучения поверхностных валений в жидкостях.

М.-К. м. даёт возможность практич. исследования фазовых диаграмм смесей и магн. систем. Осн. проблемы в этой области связаны с изучением упорядоченных состояний систем и с определением области устойчивости. Много работ посвящено природе фазовых переходов и поведению системы вблизи критич. точки, а также динамике этого процесса. Чаще всего эти проблемы исследуются на *Изинга модели*.

М.-К. м. применяют также для исследования квантовых жидкостей и кристаллов. С помощью этого метода можно решать ур-ния Шрёдингера и получать точные численные оценки для характеристик осн. состояния бозонной системы.

Важное практич. применение М.-К. м. нашёл в ядерной геофизике. Широкое использование нейтронного и гамма-каротажа при поиске полезных ископаемых делает актуальными задачи переноса излучения в многокомпонентной среде и оценки ф-ции отклика прибора с учётом реальных геологич. и техн. условий измерения. Решение этих задач основано на применении М.-К. м.

В 1980-х гг. прямое статистич. моделирование стало применяться в аэро- и гидромеханике. Типичной задачей в этой области является обтекание тела произвольной геометрии высокоскоростной струёй разреженного газа. Процесс описывается пединейным ур-нием Больцмана, и оценки эксперим. величин (напр., распределение потоков импульса и энергии на поверхности тела) проце. получают с применением М.-К. м.

Лит.: Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучения, М., 1967; Соколов И. М., Численные методы Монте-Карло, М., 1973; Брэмманн С. М., Милхаулов Г. А., Статистическое моделирование, 2 изд., М., 1982; Методы Монте-Карло в статистической физике, пер. с англ., М., 1982; Кройц М., Кварки, глюоны и решетки, пер. с англ., М., 1987.

Г. Г. Талкашнев.

**МОРИНА ТОЧКА** — темп-ра  $T_M$ , при  $k$ -рой в магнитоупорядоченных кристаллах происходит переориентация спинов магнито-активных ионов от одной кристаллич. осн к другой, сопровождаемая переходом кристалла из слабферромагн. в антиферромагн. состояние. Впервые этот переход (переход Морина) наблюдался Ф. Дж. Моринном [1] в природном гематите ( $\alpha$ - $Fe_2O_3$ ) при понижении темп-ры до  $T_M = 260$  К. Гематит имеет ромбодрич. кристаллографич. симметрию и при темп-рах  $T < T_M$  является слабым ферромагнетиком (оскоженными антиферромагнетиком) со спинами (магн. моментами ионов), лежащими в базисной плоскости (111). Ниже  $T_M$  спины ионов  $Fe^{3+}$  перероориентируются (см. *Ориентационные фазовые переходы*) к тригональной осн [111] и кристалл становится чистым антиферромагнетиком. Как видно из рис. 1, где представлена температурная зависимость магн. момента слабого ферромагнетика, с приближением к  $M$ , т. е. его намагниченность резко уменьшается (небольшой магн. момент остаётся за счёт магнетизма примесей). Величина слабферромагн. момента ( $\sim 1 \cdot 10^{-3}$   $\mu_B$ ) мала

по сравнению с полым магн. моментом иона  $Fe^{3+}$  (равный  $5\mu_B$ , где  $\mu_B$  — магнетон Бора). В работе [2] была предложена модель, объясняющая слабый ферромагнетизм небольшой неколлинеарностью (скашиванием) антиферромагн. подрешётки. Теоретич. доказательство существования слабого ферромагне-

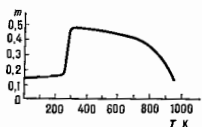


Рис. 1. Температурная зависимость магнитного момента  $m$  (в единицах  $\mu_B$  на молекулу) монокристалла гематита.

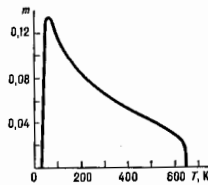


Рис. 2. Температурная зависимость магнитного момента  $m$  (в единицах  $\mu_B$  на молекулу) ортоферита дистрофия ( $T_M = 40$  К).

тазма гематита было дано И. Е. Дзюлопским [3] на основе термодинам. рассмотрения фазового перехода при учёте магнитной симметрии. Согласно [3], наличие слабого ферромагнетизма гематита выше  $M. T.$  и отсутствие его ниже этой точки связано с различием магн. симметрии в этих состояниях. Перестройка магнитной атомной структуры при переходе Морина (фазовом переходе 1-го рода) определяется температурной зависимостью констант магнитной анизотропии.

Влияние внеш. магн. поля и гидростатич. давления на темп-ру Морина  $T_M$  и на характер перехода слабый ферромагнетизм  $\rightarrow$  антиферромагнетизм изучено достаточно подробно [4, 5, 6]. Спин-перезориентационные переходы Морина наблюдались также в редкоземельных ортоферритах и ортохромитах [7] (рис. 2).

Лит.: 1) Morin F. J., Magnetic susceptibility of  $\alpha-Fe_2O_3$  and  $\alpha-FeO_3$  with added titanium, «Phys. Rev. Lett.», 1956, v. 78, p. 819; 2) Борова и н.-розови и в А. С., Орлова и М. П., Магнитные свойства карбонатов кобальта и марганца, «ЖРФ», 1956, т. 31, с. 578; 3) Дзюлопский И. Е., Термодинамическая теория «слабого» ферромагнетизма антиферромагнетизма, «НДТФ», 1957, т. 32, с. 1547; 4) Flanders P. J., Metamagnetic effects in hematite, «Phys. Mag.», 1968, v. 14, p. 1; 5) Боскани Р. А., Левитин Р. З., Шуров В. А., Магнитоструктура монокристалла гематита в полях до 150 кГ, «НДТФ», 1968, т. 54, с. 790; 6) Watanabe R. C., Anderson D. H., Pressure dependence of the Morin transition in the weak ferromagnet  $\alpha-Fe_2O_3$ , «Phys. Rev.», 1967, v. 155, p. 496; 7) Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках, М., 1979. А. М. Рабичева.

МОТТА ПЕРЕХОД — см. в ст. Переход металл — диэлектрик.

**МОТТОВСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ** (диэлектрики Мотта — Хаббарда) — кристаллы с диэлектрич. свойствами, происходящие к-рых связано не с влиянием периодич. поля кристаллич. решётки (как и обычных диэлектриках или полупроводниках типа Ge и Si), а с сильным межэлектронным взаимодействием. Это состояние реализуется, если характерная энергия межэлектронного (кулоновского) взаимодействия  $U = e^2/r$  ( $r$  — ср. расстояние между электронами) больше ср. кинетич. энергии электронов, мерой к-рой является ширина разрыхлённой зоны  $W = \hbar^2/m^2$  ( $m$  — эффективная масса электрона). При  $U < W$  пригодна простая зонная диаграмма твёрдого тела (см. Зонная теория). Если  $U > W$ , то ситуация радикально изменяется. Зона может быть заполнена электронами частично, как в металлах, однако движение электронов, необходимому для переноса заряда, мешают др. электроны, находящиеся на соседних атомах. Своим отталкиванием они «запирают» (локализуют) каждый электрон на своём атоме и делают вещество диэлектриком. Это имеет место в системе, если  $r > a_0$ , где  $a_0$  — борковский радиус. Более аккуратный анализ даёт критерий  $n^{1/4} a_0 \approx 0,02$ , где  $n$  — концентрация электронов.

При малой концентрации ( $n^{1/4} a_0 < 0,02$ ) в электроцентриальной системе электроны и дырки образуют связанные состояния — экситоны и вещество, лишённое носителей заряда, оказывается непроводящим — диэлектриком. При большей концентрации ( $n^{1/4} a_0 > 0,02$ ) акриновро кулоновского взаимодействия приводит к исчезновению связанных состояний и происходит переход диэлектрик — металл (переход Мотта, см. Переход металл — диэлектрик). В 1949 Н. Ф. Мотт (N. F. Mott) объяснил переход кристалла на металл. состоянии в диэлектрическое при изменении давления и темп-ры уменьшением  $W$ .

Др. трактовка М. д. основана на использовании дискретной модели, описывающей электроны, перемежающиеся с узла  $j$  на узел  $i$  кристалла (с матричными элементами перехода  $t$ ) при отталкивании двух электронов на одном узле (модель Хаббарда). Мерой кинетич. энергии электронов при этом также является ширина электронной зоны  $W = 2zt$ , где  $z$  — число ближайших электронов — соседей. Если в системе имеется один электрон на узел (центр) (концентрация электронов  $n = N_{эл}/N_{ат} = 1$ ) и  $W > U$ , то вещество будет металлом с наполненной заполненной зоной. Однако при сильном взаимодействии ( $U > W$ ) в осн. состоянии электроны локализованы на своих центрах и вещество оказывается М. д. Чтобы создать в такой системе подвижные носители заряда, надо «перенести» электрон со «своего» узла на какой-то другой, на к-ром уже есть электрон; на это надо затратить энергию  $\sim U$ , а выигрыш в энергии за счёт делокализации получающихся дырки и лишнего электрона порядка  $W$ , так что при  $U > W$  это невыгодно, и вещество остаётся диэлектриком со щелью  $\sim (U - W)$  (щель Мотта — Хаббарда), хотя с точки зрения обычной зонной схемы оно было бы металлом.

Реально к М. д. принадлежат мн. соединения периодич. и редкоземельных металлов с частично заполненными внутренними  $d$ - или  $f$ -оболочками. В силу малого радиуса  $d$ - и  $f$ -орбиталей их перекрытие и матричный элемент перехода малы, и для них легко выполняется условие  $U > W$ .

В фазе М. д. на центре имеются локализов. электроны, т. е. локализов. магн. моменты. Соответствующие подобные вещества обычно обладают магн. упорядочением, как правило, оно — антиферромагнетиком. Магн. упорядочение в этом случае обусловлено т. н. коесонным обменным взаимодействием; оно возникает при частичной делокализации электронов — виртуальных переходах их на соседние (заятые) центры. Так описывается электронная структура и магн. свойства мн. соединений переходных металлов типа NiO. В непрерывной среде (без учёта периодич. потенциальной решётки) состоянием, родственном М. д., является т. н. вигнеровский кристалл, в к-ром электроны при малой плотности локализованы и образуют кристаллич. структуру с периодом, определяемым их плотностью.

При изменении внеш. условий (давления, темп-ры, состава соединения) в веществах, находящихся в фазе М. д., может произойти переход в металл. состояние. Он может сопровождаться изменениями в кристаллич. структуре и исчезновением магн. упорядочения. Механизм перехода Мотта во многом ответствен за переход металл — диэлектрик в таких веществах, как  $V_2O_5$ , или в парах металлов.

Лит.: Мотт Н. Ф., Переходы металл — изолятор, пер. с англ., М., 1979; Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чулковский Ф. А., Фазовый переход металл — полупроводник и его применение, Л., 1979; Хомский Д. И., Небольшие электроны в кристаллах, М., 1967. Д. И. Хомский.

**МОТТОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ** — рассеяние, обусловленное взаимодействием спина заряженной частицы с её орбитальным моментом, возникающим при движении в электр. поле рассеивающего центра. Носит имя Н. Ф. Мотта (N. F. Mott), разработавшего релятивистскую теорию рассеяния электронов. Характерной осо-

бенностью  $M. p.$  является его асимметрия относительно плоскости, содержащей спина и импульс электрона. Такая асимметрия используется для измерения поляризации электронов (см. ниже).

Пусть в системе покоя электронов, в к-рой определено направление их спинов, движется рассеивающий заряд. Центр со скоростью  $v$ . Ток, соответствующий дви-



жению этого центра, создаёт магн. поле  $H = E \cdot v/c$ , где  $E$  — напряжённость электр. поля, создаваемого центром. Т. о., в системе отсчёта, движущегося вместе с электроном, на его спин действует эфф. магн. поле, созданное током, т. е. рассеивающим зарядом центром. Это приводит к изменению энергии электрона на величину  $\mu H$ , где  $\mu$  — магн. момент электрона, связанный с его спином  $s$ :  $\mu = (e/mc) \hbar s$  ( $e, m$  — заряд и масса электрона).

Пусть две траектории электронов 1 и 2 проходят на мин. расстоянии  $x$  от положительно заряженного кулоновского центра  $C$  (рис. 1). В зависимости от того, слева ( $x < 0$ ) или справа ( $x > 0$ ) от центра проходит электрон, он рассеивается соответственно направо или налево. Если спин электронов направлен вдоль осей  $+y$ , их магн. момент  $\mu$  направлен вдоль  $-y$  (т. е.  $\mu < 0$ ). На спины электронов, движущихся слева и справа от кулоновского центра, действуют противоположно направленные магн. поля, индуцированные движением этого центра. Это приводит к разл. изменению потен. энергии  $\mathcal{E}(x)$  электронов на траекториях 1 и 2 (рис. 1). Для траектории 1 энергия свин-орбитального взаимодействия  $\mu H$  прибавляется к энергии  $\mathcal{E}(x)$  эл.-статич. взаимодействия; для траектории 2 вычитается из  $\mathcal{E}(x)$ . Т. о., суммарная потен. энергия оказывается чётной ф-цией. При этом электронам, пролетающим слева от  $C$ , соответствует больший рассеивающий потенциал, чем для электронов, пролетающих на том же расстоянии справа от  $C$ . Различие в потенциалах приводит к увеличению интенсивности рассеяния вправо по сравнению с интенсивностью рассеяния влево. Очевидно, что при изменении ориентации спинов (или скоростей) на противоположную знак асимметрии изменится.

Асимметрия  $M. p.$  приводит к поляризации исходящего потока электронов, рассеиваемых в заданном направлении. При этом поляризация электронов  $P = S(\theta)/N$ , где  $N$  — единичный вектор вдоль нормали к плоскости рассеяния, включающей начальный  $p$  и конечный  $p'$  импульсы,  $\theta$  — угол между  $p$  и  $S(\theta)$  — т. е. ф-ция Шермана (рис. 2). Эта ф-ция определяет степень поляризации электронов:  $P = (n_+ - n_-)/(n_+ + n_-)$ , где  $n_+$  и  $n_-$  — числа электронов с противоположно направленными спинами. Направо рассеиваются преимущественно электроны со спинами, ориентированными вдоль осей  $+y$ , налево — вдоль  $-y$  [при этом величина  $S(\theta)$  для рассеянных налево и направо электронов составляет  $+S$  и  $-S$ ]. Эта же ф-ция  $S(\theta)$  определяет

величину асимметрии рассеяния частично поляризованных вдоль  $N$  электронов:  $A = (N_{\downarrow} - N_{\uparrow})/(N_{\downarrow} + N_{\uparrow})$ . Здесь  $N_{\downarrow}$  и  $N_{\uparrow}$  — числа электронов, рассеянных налево и направо. Зная  $S(\theta)$  по измеренной величине  $A$ , анализируется поляризация электронов  $P$ ; на этом принципе работает детектор Мотта. Т. о., анализирующая и поляризующая способности  $M. p.$  характеризуются ф-цией Шермана. Зная  $S(\theta)$ , можно определить поляризацию электронов (с энергией  $\mathcal{E} \geq 100$  кэВ), рассеиваемых атомными ядрами на достаточно большие углы, когда можно пренебречь эффектами экранировки кулоновского барьера ядра. Величина  $S$  растёт с ростом заряда ядра, степень поляризации электронов, рассеянных на золоте, может достигать 40–50%.

Детектор Мотта используется для калибровки др. поляризац. детекторов. Типичная схема эксперимента с детектором Мотта представлена на рис. 3. Если измеряется поляризация электронов с малой энергией, они предварительно ускоряются до энергии  $\mathcal{E} \sim 100$  кэВ с помощью ускорителя 1 и после рассеяния под углом  $\theta = +120^\circ$  на золотой фольге 2 регистрируются детекторами 3 и 4. Детектор Мотта использовался при исследовании несохранения чётности при  $\beta$ -распаде ядра, к-рая приводит к возникновению продольной поляризации электронов (вдоль их импульса). Т. к. детектор измеряет только поперечную поляризацию электронов, использовались дополнительные электр. или магн. поля, обеспечивающие относ. разворот векторов импульса и спина электронов.

Для исключения влияния многократного рассеяния электронов на меньшие углы при том же результирующем угле  $\theta$  необходимо использовать мишени с относительно небольшой плотностью атомов. Так, напр., плотность пучка атомов Hg (мишени) должна соответствовать давлению  $p < 10^{-3}$  мм рт. ст.; толщина золотой фольги, используемой в детекторах Мотта, не должна превышать 100 нм.

Лит.: Мотт Н., Мессис Г., Теория атомных столкновений, пер. с англ., {3 изд.}, М., 1969. В. Г. Флейшер. **МОЩНОСТЬ** — физ. величина, измеряемая отношением работы к промежутку времени, в течение к-рого она произведена. Если работа производится равномерно, то  $M$  определяется ф-лой  $N = A/t$ , где  $A$  — работа, совершённая за время  $t$ ; для общего случая  $N = dA/dt$ , где  $dA$  — элементарная работа, производимая за элементарный промежуток времени  $dt$ .  $M$  в системе СИ измеряется в Вт.

**МОЩНОСТЬ ЗВУКА** — энергия, передаваемая звуковой волной через рассматриваемую поверхность в единицу времени. Различают мгновенное значение  $M$  з. и среднее за период или за длит. время. Наиб. интерес представляет ср. значение  $M$  з., отнесённое к единице площади, — т. п. ср. удельная  $M$  з., или **интенсивность звука**. Для плоской гармонич. бегущей звуковой волны ср. удельная  $M$  з.

$$\omega = \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2 = \frac{1}{2} \rho c^2 p_0^2$$

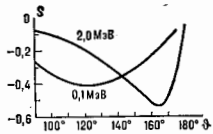


Рис. 2. Функция Шермана для золота при энергии электронов 0,1 МэВ и 2,0 МэВ.

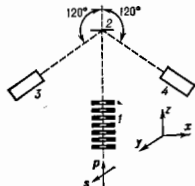


Рис. 3. Схема детектора Мотта: 1 — ускоритель; 2 — золотая фольга; 3, 4 — счётчики электронов.

где  $P_0$  и  $v_0$  — амплитуды звукового давления и колебательной скорости частиц,  $\rho$  — плотность среды,  $c$  — скорость звука в ней. Величина  $\omega$  — важная характеристика акустич. излучателя. М. з. в системе СИ измеряется в Вт, в системе СГС — в эрг/с ( $1 \text{ Вт} = 10^7 \text{ Дж/с} = 10^7 \text{ эрг/с}$ ). Удельная М. з. измеряется соответственно в Вт/м<sup>2</sup> и в эрг/с·см<sup>2</sup>; на практике при оценке свойств УЗ-излучателей пользуются единицей Вт/см<sup>2</sup>.

**МУЛЬТИВИБРАТОР** (от лат. multum — много и vibro — колеблю) — электронное устройство с двумя metastабильными состояниями, к-рым соответствуют два различных значения напряжения (или тока) и к-рые периодически скачкообразно сменяют друг друга за счёт положительной обратной связи. М. генерирует периодический сигнал прямоугольной формы, в спектре к-рого содержится много гармоник (см. Фурье анализ). Если интервалы времени, соответствующие различным состояниям, одинаковы, М. называют симметричным, иначе — несимметричным. Названные интервалы времени определяются временем зарядки и (или) разрядки конденсаторов (одного или двух), входящих в схему. М. может быть построен на операционных усилителях, транзисторах биполярных и полевых транзисторах, компараторах и др. электронных приборах.

В схеме симметричного М. (рис. 1) операционный усилитель (ОУ) осуществляет сравнение напряжения  $U_C$  на конденсаторе  $C$  и напряжения  $U$  с делителя, образо-

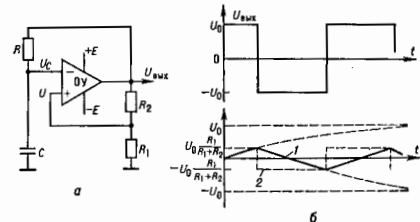


Рис. 1. Симметричный мультивибратор на операционном усилителе: а — схема; б — временные диаграммы напряжений; 1 — напряжение  $U_C$ ; 2 — напряжение  $U$ .

ванного резисторами  $R_1$  и  $R_2$ . Напряжение  $U_{\text{вых}}$  на выходе ОУ пропорционально разности напряжений между его входами  $\Delta U = U - U_C$ . Из-за того, что часть выходного напряжения через делитель поступает на вход ОУ, в схеме образуется положительная обратная связь. Если в нек-рый момент времени разность  $\Delta U$  станет положительной (напр., вследствие флуктуаций), то положительная обратная связь приведет к лавинообразному нарастанию напряжения. Его увеличение прекратится, когда  $U_{\text{вых}}$  достигнет своего максимального возможного значения  $U_0$ , близкого к положительному напряжению питания  $+E$ . При этом напряжение  $U$  будет равно  $U_0 R_1 / (R_1 + R_2)$ . Такое состояние системы сохранится до тех пор, пока напряжение  $U_C$  на конденсаторе, заряжающемся через резистор  $R_2$ , не превысит значения  $U = U_0 R_1 / (R_1 + R_2)$ . Как только разность  $\Delta U$  станет отрицательной, напряжение  $U_{\text{вых}}$  близкое к отрицат. напряжению питания  $-E$ . Напряжение  $U$  станет равным  $-U_0 R_1 / (R_1 + R_2)$  и конденсатор начнет разряжаться. Когда напряжение  $U_C$  сравняется с  $U = -U_0 R_1 / (R_1 + R_2)$ , выходное напряжение снова скачком увеличится до значения  $U_0$  и т. д. Время зарядки и разрядки конденсатора одинаково и пропорционально  $RC$ .

Несимметричный М. (рис. 2) работает аналогичным образом, но благодаря диодам  $D$  и  $D'$  конденсатор за-

ряжается и разряжается через разные резисторы ( $R$  и  $R'$ ), поэтому время зарядки и разрядки различно.

Др. распространенная схема М. представляет собой два усилительных транзисторных каскада, охваченных перекрестной положительной обратной связью через конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 3). Благодаря этой связи состояния, когда оба транзистора  $T_1$  и  $T_2$  закрыты (ток коллектора близок к нулю, напряжение на коллекторе близко к напряжению питания  $E$ ) или открыты (напряжение на коллекторе близко к нулю), неустойчивы. Любое изменение напряжения на кол-

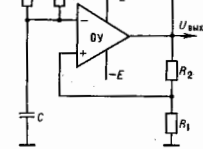


Рис. 2. Несимметричный мультивибратор на операционном усилителе.

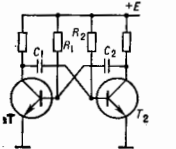


Рис. 3. Мультивибратор на биполярных транзисторах.

лекторе (или тока базы) одного из транзисторов лавинообразно нарастает и завершается открыванием одного из транзисторов и закрыванием другого. Такое состояние сохраняется в течение времени перезарядки конденсатора, подключенного к базе закрытого транзистора. По истечении этого интервала, пропорционального  $R_2 C_2$  или  $R_1 C_1$ , открытое состояние транзистора скачком изменяется на закрытое, и наоборот. Такой процесс смены состояний периодически повторяется.

В практич. схемах М. скорость перехода между состояниями ограничена наличием паразитных емкостей схемы и конечным быстродействием применяемых электронных приборов. М. широко используются в радиообразных устройствах радиотехники в качестве генераторов прямоугол. импульсов для создания пилообразного напряжения (см. Генератор пилообразного напряжения) и т. п. Для получения одиночных импульсов заданной длительности и импульсов, синхронных с др. импульсными сигналами, применяются т. н. ждущие М. (см. Одновибратор).

Лит.: Титце У., Шенк К., Полупроводниковая схемотехника пер. с нем., М., 1982. А. В. Степанов.

**МУЛЬТИПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ** — модели множественных процессов, в к-рых

вторичные частицы (или группы частиц) с 4-импульсами  $p_i$  рождаются в узлах мультипериферич. пенечки в результате обмена виртуальными частицами с 4-импульсами  $q_i$  (рис.) [1,2]. Наб. популяриям модели М. в., в к-рых обмен осуществляется ионами и легкими резонансами ( $\rho, \omega, f$ ), а также учитывается возможность образования кластеров — фэйрболов [3,4]. При использовании этих моделей для анализа множеств. процессов в узлах мультипериферич. пенечки допускалось рождение легких резонансов и учитывался обмен не только пионовой, но  $\rho$ -,  $\rho'$ -,  $\omega$ -,  $f$ - и  $A_2$ -траекториями Редже (см. Редже полюсов метод). Для описания корреляций вторичных частиц необходимо было ввести ветвле-

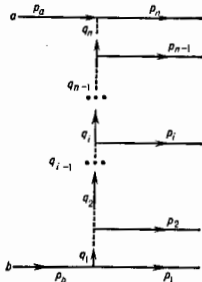


Диаграмма мультипериферического взаимодействия: а, б — первичные частицы;  $p_n$ ,  $p'_n$  — их 4-импульсы.

ние печенок и сделать их усиленными, т. е. окружить вершины доплотить померонными обемнами (с. *Поме-ром*). Всё это привело к появлению большого числа параметров в модели [4].

Наиб. полно была разработана модель М. в. с учётом образования фибрилов, в к-рой обемн осуществляется пронами [3]. Её осн. параметры определялись из сравнения с данными по полным сечениям  $nN$ -и  $NN$ -взаимодействий (1973). На основе этой модели на ЭВМ были получены наборы (наиграп баню) «искуств. событий» для  $nN$ -и  $NN$ -взаимодействий в интервале энергий (в лаб. системе) от 28 до 400 ГэВ, к-рые использовались для сравнения с эксперим. данными, как имевшимися в то время, так и появляющимися впоследствии. Расхождение всюду не превыало 10—15%. В результате были описаны осн. характеристики одностепенных и двухчастичных инклюзивных процессов в интервале энергий от 5 до 63 ГэВ в системе центра инерции: *масштабная инвариантность*, понижение инвариантных сечений в области фрагментации, обильное рождение резонансов, корреляции по *быстротам* и *аллугатуральным корреляциям* [2—5].

В развитых позднее партоновых представлениях о динамике сильного взаимодействия (см. *Партоны*) широко используются общие черты кинематики М. в. [1, 2]. Лит.: 1) Никитин Ю. П., Розенталь В. Л., Теория множественных процессов, М., 1976; 2) Гринши В. Г., Инклюзивные процессы в адронных взаимодействиях при высоких энергиях, М., 1982; 3) Фейнберг Е. Д., Термодинамические фибрилы, «ФФН», 1983, т. 139, с. 37; 4) Дин Е. М., Рыськин М. Г., Возможность постоянного полного сечения в мультипериферических моделях, «ЯФФ», 1973, т. 11, с. 388; 5) Дин Е. М., Рыськин М. Г., Корреляции по быстротам в мультипериферическом подходе при учете ветвления, «ЯФФ», 1975, т. 21, с. 398. В. Г. Грышин.

**МУЛЬТИПЛЕКСНАЯ ГОЛОГРАФИЯ** (от лат. *multiplex* — многократный, многообразный) — метод регистрации обьемных изображений, включающий фотот. стёмку разл. ракурсов объекта (РО) с последующей записью *голограмм* этих ракурсов на одном носителе; даёт возможность регистрации и воспроизведения обьемных изображений объектов, прямое голографирование к-рых либо затруднено, либо невозможно осуществить в связи с их большими размерами или нестабильностью.

На первом этапе голографирования производится фото- или киносёмка РО за счёт отосит. перемещения камеры и объекта. Затем либо с использованием обратных, либо за счёт перенатки получают плёнку с позитивными изображениями РО. На втором этапе производится голографич. регистрация этих изображений. При восстановлении голограмм возникает совокупность изображений РО; пучки лучей, строящие эти изображения, пространственно организованы таким образом, что каждый глаз наблюдателя видит только одно ракурсное изображение. Изменяя положение глаза, можно видеть разл. РО; при наблюдении обоими глазами возникает эффект обьемности.

Регистрация голограмм ракурсных изображений осуществляется тремя способами. Согласно 1-му способу, на одном и том же участке фоточувствит. среды производится последоват. запись голограмм сфокусиров. изображений РО. Пространственное разнесение зон видения изображений разл. РО производится за счёт изменения угла между объектами и опорным пучками при переходе от записи одной голограммы к записи последующей. Осн. недостатком данного способа является то, что с увеличением числа РО, к-рые необходимо зарегистрировать на голограмме, падает дифракц. эффективность последней, т. к. на одном и том же участке светочувствит. материала происходит некогерентное сложение голограмм.

При использовании 2-го способа этот недостаток исключается благодаря тому, что регистрация голограмм ракурсных изображений осуществляется на смежные участки светочувствит. материала в виде полосок шириной 2—5 мм. При восстановлении такой голо-

граммы каждый ракурс виден через соответствующую полоску. Недостатком 2-го способа является то, что для восстановления изображений необходимы точечные источники монохроматич. излучения, т. к. при использовании этого способа регистрируются *Френеля голограммы* или *Фурье голограммы*. Для того чтобы восстанавливать изображение полихроматич. источником, проводят дополнит. операцию, к-рая заключается в записи голограммы сфокусиров. изображений, восстановленных голограммой, полученной на первом этапе. Но т. к. запись голограмм изображений РО производится одновременно, то не происходит падения дифракц. эффективности, присущего 1-му способу.

3-й способ в отличие от 2-го является одностепенным, голограммы РО регистрируются на отд. участках светочувствит. материала в виде узких полосок шириной 0,3—0,5 мм. Голограмма может восстанавливаться источником полихроматич. излучения. Такая возможность возникает благодаря тому, что при использовании астигматич. оптич. системы голограмма каждого ракурса является в плоскости дисперсии голограммой сфокусиров. изображений, а в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии, осевой голограммой Фурье. Обычно такие голограммы регистрируются на плёнке, к-рая затем сворачивается в виде цилиндра и подсвечивается сверху или снизу с помощью небольшой лампочки. Наблюдатель видит изображение объекта внутри цилиндра. Поворачивая цилиндр вокруг оси или обходя его, можно рассматривать изображение объекта со всех сторон.

Лит.: Кольвер Р., Беркхарт К., Дин Е. Л., Оптич. голография, пер. с англ., М., 1973; Редманн J. D., Novel applications of holography, «J. Sci. Instr.», 1968, v. 1, p. 821; Де Битетто, Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recording, «Appl. Opt.», 1969, v. 8, p. 1740; Гальперн А. Д., Вурья В. П., О регистрации композиционных голограмм Френеля, «Оптика и спектр», 1980, т. 48, с. 1177. А. Д. Гальперн.

**МУЛЬТИПЛЕТНОСТЬ** — число  $2S+1$  возможных ориентаций в пространстве полного спина атомной системы (где  $S$  — спиновое квантовое число системы). В случае  $LS$ -спина (нормальный спин, см. *Связь векторов*) при  $L \geq S$  ( $L$  — орбитальное квантовое число) М. равна числу возможных ориентаций в пространстве полного момента  $J$  атомной системы (т. е. кратности вырождения уровня энергии). При  $L < S$  число возможных ориентаций  $J$  равно  $2L+1$ , однако и в этом случае М. числ.  $2S+1$ .

М. определяет расщепление уровня энергии на компоненты. Это расщепление обусловлено релятивистскими эффектами в атомной системе (гл. обр. *спин-орбитальным взаимодействием*), наз. тонким или мультиплетным и определяется правилом интервалов Ланде. При  $2S+1 = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$  уровни энергии соответственно наз. синглетными, дублетными, триплетными, квартетными, квинтетными и т. д. Значения М. указывают слева вверху от полного обозначения уровня энергии:  $2S+1L_J$ .

М. атомных систем определяется числом электронов в незаполненных оболочках, т. к. для замкнутых оболочек  $S = 0$ . Так, для атома Н и атомов щелочных элементов (один электрон во внеш. оболочке) возможны только дублетные состояния, т. к. для таких атомов  $S = 1/2$ , для атомов щёлочноземельных элементов (два электрона во внеш. оболочке) — синглетные ( $S = 0$ , спины электронов антипараллельны) и триплетные ( $S = 1$ , спины электронов параллельны) состояния. Их обозначают:

$$^1S_0, ^1P_1, ^1D_2, ^3S_1, ^3P_{0,1,2}, ^3D_{1,2,3}$$

В случае  $LK$ -,  $JK$ - и  $ij$ -связи обозначения уровней энергии имеют более сложный вид. Так, для двухэлектронной конфигурации  $n_1n_2p$  соответственно уровни  $L[K]$  имеют вид

$$S\left[\frac{1}{2}\right]_{0,1}, P\left[\frac{1}{2}\right]_{0,1}, P\left[\frac{3}{2}\right]_{1,2}, D\left[\frac{3}{2}\right]_{1,2}, D\left[\frac{5}{2}\right]_{2,3};$$

уровни  $\{K\}J$ :

$$\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} \right]_{0,1}, \frac{3}{2} \left[ \frac{1}{2} \right]_{0,1}, \frac{1}{2} \left[ \frac{3}{2} \right]_{1,1}, \frac{3}{2} \left[ \frac{3}{2} \right]_{1,1}, \frac{3}{2} \left[ \frac{5}{2} \right]_{2,2};$$

уровни  $\{J_1 J_2\}J$ :

$$\left[ \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right]_{0,1}, \left[ \frac{1}{2}, \frac{3}{2} \right]_{1,1}, \left[ \frac{3}{2}, \frac{1}{2} \right]_{1,1}, \left[ \frac{3}{2}, \frac{3}{2} \right]_{0,1,2,2}.$$

Для химически устойчивых молекул, имеющих, как правило, чётное число электронов, характерны  $M$ .  $2S + 1 = 1$  для основного и  $2S + 1 = 1$  и  $2S + 1 = 3$  для возбуждённых состояний. В. П. Шелезко.

**МУЛЬТИПЛЕТЫ** частиц — группы элементарных частиц (дублеты, триплеты, октеты, декуплеты и др. объединения частиц с большим числом составляющих), обладающих одинаковым спином, а в случае, когда они образованы адронами, также и одинаковой вращательностью. Частицы, входящие в  $M$ , как правило, имеют близкие по значению величины масс. Существование  $M$  является отражением наличия определённых свойств симметрии и взаимодействий элементарных частиц. Математически симметрия проявляется в инвариантности (обычно приближённой) взаимодействий частиц относительно преобразований, принадлежащих тем или иным группам, напр. группе  $SU(2)$  (группе изотопической инвариантности), группе  $SU(3)$  (группе т. н. унитарной симметрии), группе  $SU(2)_v$  (группе слабого изоспина) и др. Мультиплеты объединяют частицы,  $k$ -ые по своим трансформ. свойствам принадлежат одному из неприводимых представлений группы (отсюда точно фиксированное число частиц, входящих в  $M$ , зависящее от типа группы). Соответственно говорят об изотопич. мультиплетах, унитарных мультиплетах и т. п. Приближённый характер симметрии обуславливает различие масс частиц, входящих в  $M$ . Чем сильнее нарушена симметрия, тем больше отличаются по массам отд. компоненты  $M$ . В теории элементарных частиц обсуждаются симметрии (сильно нарушенные при небольших энергиях), отвечающие великому объединению взаимодействий,  $M$ , связанные с соответствующими группами  $[SU(5), SO(10)$  и др.], содержат в своём составе частицы, обладающие как сильными, так и электрослабыми взаимодействиями. Массы частиц в таких  $M$  могут различаться очень сильно. Обсуждается также существование (при очень высоких энергиях) суперсимметрий. Неприводимые представления групп, отвечающих суперсимметрии, описывают частицы разных спинов (целых и полуцелых). В этой связи можно говорить о супермультиплетах. Простейший супермультиплет такого типа содержит частицы со спином  $J$  (дважды),  $J - 1/2$ ,  $J + 1/2$ . Эти частицы могут заметно различаться по массам. А. А. Комаев.

**МУЛЬТИПОЛИ** (от лат. multum — много и греч. polos — полюс) — определённые конфигурации точечных источников (зарядов). Простейшими примерами  $M$  служат: точечный заряд —  $M$  нулевого порядка; два противоположных по знаку заряда, равных по абс. величине, — диполь, или  $M$  1-го порядка; 4 одинаковых по абс. величине заряда, размещённых в вершинах параллелограмма, так что каждая его сторона соединяет заряды противоположного знака, — квадруполь, или  $M$  2-го порядка. Название  $M$  включает обозначение числа зарядов (на греч. языке), образующих  $M$ , напр. октоуполь (окту — 8) означает, что в состав  $M$  входит 8 зарядов. Выделение таких конфигураций связано с описанием полей от сложных, ограниченных в пространстве систем источников. На больших расстояниях (для статич. полей, значительно превышающих размеры системы источников) поле от таких систем устроено относительно просто и может быть описано как суперпозиция полей нек-рого числа  $M$ . Это тл. физ. основание для введения понятия  $M$ . Осн. характеристика  $M$  — мультипольный момент,  $k$ -ый позволяет однозначно связать поля  $M$  с полями сложных систем

источников на больших расстояниях. Эта связь приводит к упрощениям широкого класса задач, т. к. поля  $M$  относительно просты в силу повш. симметрии относительно вращений и перестановок зарядов мультипольных конфигураций.

Введение мультипольного момента основано на доволно простых соображениях, к-рые удобно проиллюстрировать на примере статич. элетрич. полей, создаваемых системой точечных зарядов  $e_i$ . В системе координат с центром, расположенным где-нибудь внутри системы зарядов, положения зарядов характеризуются радиус-векторами  $r_i$  ( $i$  — номер заряда). Потенциал этой системы зарядов в точке  $R$  определяется суммой потенциалов всех частиц:

$$\varphi(R) = \sum_i \frac{e_i}{|R - r_i|}.$$

Если интересующая нас точка  $R$  значительно удалена от системы зарядов, т. е.  $|r_i|/|R| \ll 1$ , то потенциал можно разложить в *Тейлора ряд* по степеням этого отношения:

$$\varphi(R) = \varphi^{(0)} + \varphi^{(1)} + \dots + \varphi^{(l)} + \dots;$$

$$\varphi^{(l)} = \frac{1}{l!} \sum_i e_i r_i^\alpha r_i^\beta \dots r_i^\lambda \frac{\partial^l}{\partial R_\alpha \partial R_\beta \dots \partial R_\lambda} \cdot \frac{1}{R},$$

где  $\alpha, 1, 2, 3$  — нумеруют компоненты соответствующих векторов; по повторяющимся  $\alpha$ ; производится суммирование. Такое разложение потенциала наз. разложением по  $M$ . или мультипольным разложением. В нулевом приближении

$$\varphi(R) = \varphi^0 = \frac{\sum_i e_i}{R},$$

т. е.  $\varphi^{(0)}$  совпадает с потенциалом точечного заряда  $q$ , равного суммарному заряду системы. Величина  $\sum_i e_i$  — мультипольный момент нулевого порядка — полностью определяет в этом приближении потенциал поля на больших расстояниях.

Следующий член разложения

$$\varphi^{(1)} = \sum_i e_i r_i \frac{n}{R^2}.$$

Здесь  $n$  — единичный вектор, направленный вдоль  $R$ . Величина  $d = \sum_i e_i r_i$ , определяющая (если  $q = 0$ ) потенциал в 1-м порядке, наз. *дипольным моментом* системы зарядов или мультипольным моментом 1-го порядка. Т. о., характеризируя потенциал (или поле) в 1-м порядке, можно заменить систему зарядов точечным зарядом  $q$  и диполем с дипольным моментом  $d$ . След. член разложения  $\varphi^{(2)}$  после нек-рых преобразований записывается в виде

$$\varphi^{(2)} = \frac{D_{ab} n_a n_b}{2R^3},$$

где  $D_{ab} = \sum_i e_i (3r_i^a r_i^b - |r_i|^2 \delta_{ab})$  (или  $Q_{ab} = D_{ab}/6$ ) наз. *квадрупольным моментом* системы зарядов ( $\delta_{ab}$  — *Кronecker символ*).

Общий член разложения потенциала определяется неприводимым тензором  $l$ -го ранга

$$d_{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_l} = \sum_i e_i r_i^{\alpha_1} r_i^{\alpha_2} \dots r_i^{\alpha_l},$$

$k$ -ый наз.  $2^l$ -польным моментом системы зарядов,  $l$  — порядок  $M$ . Тензор  $2^l$ -польного момента симметричен по всем индексам и обращается в нуль при сворачивании по любой паре индексов. Общий член раз-

ложения потенциала имеет более компактную форму при разложении  $\Phi(R)$  по сферическим функциям:

$$\Phi^{(l)} = \frac{1}{R^{2l+1}} \sum_{m=-l}^l \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} Q_m^{(l)} Y_m^*(\theta, \varphi),$$

$$Q_m^{(l)} = \sum_{i=1}^N e_i r_i^l \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} Y_{lm}(\theta_i, \varphi_i),$$

где  $Y_{lm}$ ,  $Y_{lm}^*$  — сферич. ф-ции,  $\theta$ ,  $\varphi$  и  $\theta_i$ ,  $\varphi_i$  — полярный и азимутальный углы, образуемые векторами  $R$  и  $r_i$  с осями координат. Приведенная форма разложения отличается от исходного вида Тейлора только перегруппировкой слагаемых и введением сферич. ф-ций, поэтому совокупность  $2l+1$  независимых величин  $Q_m^{(l)}$  также наз.  $2^l$ -польным моментом. Если все предыдущие моменты равны нулю,  $2^l$ -польный момент не зависит от выбора начала системы координат.

Полученные соотношения позволяют дать более общее определение  $M$ , порядка  $l$  как системы зарядов, для  $k$ -рой мультипольный момент порядка  $l$  отличен от нуля, а все остальные мультипольные моменты равны нулю. Потенциал статич. поля  $M$ , порядка  $l$  убывает на бесконечности как  $R^{-(l+1)}$ . Такой характер спадания математически объясняется тем, что потенциал складывается в ряд по обратным степеням  $R$ , а физический смысл связан с интерференцией полей от отд. зарядов, входящих в  $M$ . Кроме этого,  $M$  обладает специфич. угл. зависимостью, определяемой  $l$ -й сферич. ф-цией. Характер убывания поля вдали от сложной системы зарядов позволяет заменить её совокупности  $M$ , соответствующего порядка (с соответствующими значениями мультипольных моментов).

Более аналогично мультипольное разложение можно вести для статич. магн. полей, создаваемых системой стационарных токов. Для этого необходимо провести разложение векторного потенциала магн. поля:

$$A = \frac{1}{c} \sum_i \frac{e_i v_i}{|R-r_i|},$$

$v_i$  — скорость движения  $i$ -го заряда. В отличие от случая статич. электрич. полей, разложение потенциала статич. магн. поля начинается с дипольного вклада, т.к. магн. зарядов нет (магнитные монополи пока не обнаружены). Для первого члена разложения получим

$$A^{(1)} = \frac{[MR]}{R^3},$$

где  $M = \frac{1}{2c} \sum_i e_i [r_i v_i]$  — магнитный момент системы.

След. члены разложения получаются аналогично. Общий член разложения векторного потенциала выражается через шаровые ф-ции.

Для непрерывных ограниченных распределений зарядов (источников и стоков) в приведенных выше ф-лах  $\sum_i$  заменяется объемным интегралом от соответствующей плотности заряда (тока).

Разложение по  $M$  широко используется не только в задачах электро- и магнитостатики, но и в др. областях физики, напр. в акустике и общей теории относительности.

$M$  применяют также и для исследований полей излучения систем движущихся зарядов (или переменных источников и стоков). Малым параметром, позволяющим описывать поле излучения упрощенным образом, служит отношение размеров области  $L$ , в  $k$ -рой движутся заряды, к длине излучаемой волны  $\lambda$  ( $L \ll \lambda$ ). Такое поле излучения можно представить как суперпозицию полей  $M$  с переменными во времени мультипольными моментами. В этом случае возникают три физических различных семейства  $M$  — магн.  $M$ ., определяемые по-

перечными токами, электрич.  $M$ ., подразделяющиеся на торсионные [определяемые продольными (радиальными) токами] и зарядовые  $M$ ., аналогичные обычным эл.-статич. (скалярным)  $M$ . (подробнее см. *Мультипольное излучение*).

Лит.: Л а н д а у Л. Д., Л и ф ш и ц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; А х и с с е р А. И., Е с е р с т е ц к и й В. Б., Квантовая электродинамика, 4 изд., М., 1981.

А. В. Тур, В. В. Лносский.

**МУЛЬТИПОЛЬНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** — излучение, обусловленное изменением во времени мультипольных моментов системы. Излучение огранич. систем источников представляет собой расходящиеся сферич. волны, так или иначе промодулированные по угл. переменным. Его анализ естеств. образом приводит к разложению излучаемого поля по полному набору сферических функций, обладающих определ. угл. зависимостью. При этом сама система источников, описываемая ф-циями координат ( $r$ ) и времени ( $t$ ), может быть представлена в виде набора вполне определ. конфигураций излучателей — мультиполей. Отд. мультиполи как источники излучения характеризуются только ф-циями времени — мультипольными моментами. Их зависимость от времени связана как с внутр. динамикой системы, так и с перем. внеш. воздействиями. Представление излучаемого системой поля в виде суперпозиции полей отд. мультиполей плодотворно не только в прямых задачах исследования поля излучения сложных источников, но и в обратных задачах восстановления свойств источников по характеристикам их излучения.

В электродинамике излучение воли или, в общем случае, генерация перем. эл.-магн. полей  $E = -\nabla\phi - \dot{A}/c$  и  $B = [\nabla A]$  обусловлены нестационарностью плотности электрич. заряда  $\rho(r, t)$  и тока  $j(r, t)$ . В вакууме эти поля описываются волновыми ур-ниями

$$\Delta A - \frac{1}{c^2} \ddot{A} = -\frac{4\pi}{c} j, \quad \Delta \phi - \frac{1}{c^2} \ddot{\phi} = -4\pi\rho. \quad (1)$$

Здесь векторный  $A$  и скалярный  $\phi$  потенциалы подчинены условию калибровки Лоренца  $\nabla A + \dot{\phi}/c = 0$  (см. *Градиентная инвариантность*), точка обозначает  $\partial/\partial t$ , используется Галлея система единиц. Фурье преобразование ур-ний (1) по времени  $[A(r, t) \rightarrow A(r, \omega) \exp(-i\omega t)]$  и т.д.] приводит к неоднородным Гельмгольца уравнениям

$$\left(\Delta + \frac{\omega^2}{c^2}\right) A(r, \omega) = -\frac{4\pi}{c} j(r, \omega); \quad \left(\Delta + \frac{\omega^2}{c^2}\right) \phi(r, \omega) = -4\pi\rho(r, \omega). \quad (2)$$

Решение ур-ний (2) (при условии излучения — уходящие волны при  $r \rightarrow \infty$ , см. *Волнораспределение условия излучения*) для фурье-образов потенциалов вне источников, занимающих конечную область пространства в окрестности точки  $r = 0$ , представляется в виде [без множителя  $\exp(-i\omega t)$ ]:

$$\phi(r, \omega) = 4\pi i \left(\frac{\omega}{c}\right) \sum_{l,m} P_{lm} h_l^{(1)}\left(\frac{r\omega}{c}\right) Y_{lm}(\theta), \quad (3)$$

$$A(r, \omega) = 4\pi i \left(\frac{\omega}{c^2}\right) \sum_{l,m} [n_{lm} N_{lm}(r) + m_{lm} M_{lm}(r) + c P_{lm} L_{lm}(r)]. \quad (4)$$

Здесь фурье-компоненты скалярных  $P_{lm}$ , электрич.  $n_{lm}$  и магн.  $m_{lm}$  мультипольных моментов определяются след. интегралами по области, занятой источниками:

$$P_{lm} = \int \rho(r, \omega) j_l\left(\frac{r\omega}{c}\right) Y_{lm}^*(\theta) d^3r, \quad (5)$$

$$n_{lm} = \int j(r, \omega) \tilde{N}^*(r) d^3r, \quad (6)$$

$$m_{lm} = \int j(r, \omega) \tilde{M}^*(r) d^3r. \quad (7)$$



В ур-нии (3) фигурирует сферич. ф-ция

$$Y_{lm}(n) = (-1)^{\frac{m+|m|}{2}} i^{|m|} \sqrt{\frac{(2l+1)l!(l-|m|)!}{4\pi(l+|m|)!}} P_l^{|m|}(\cos\theta) \exp(im\varphi),$$

ортономированные интегралом по сфере единичного радиуса:

$$\int Y_{lm} Y_{l'm'}^* d\Omega = \delta_{ll'} \delta_{mm'},$$

где  $\theta, \varphi$  — полярный и азимутальный углы направления  $n=r/r, P_l^{|m|}$  — присоединённые полиномы Лежандра,  $\delta_{ll'}$  — Кронекера символ (звёздочка означает комплексное сопряжение). Они являются собственными функциями операторов  $\hat{L}^2$  и  $\hat{L}_z$ :

$$\hat{L}^2 Y_{lm} = l(l+1) Y_{lm}, \quad \hat{L}_z Y_{lm} = m Y_{lm},$$

где  $\hat{L} = -i[r\nabla]$  — оператор орбитального момента импульса, ось  $z$  — заданное направление в пространстве,  $\cos\theta = n_z, -l \leq m \leq l$  и  $|m|$  — натуральные числа. В (3) и (5) входит сферич. ф-ция Ганкеля  $h_l$  (с особенностью в нуле) и регулярная (без особенностей в нуле) сферич. ф-ция Бесселя  $j_l$  (см. *Цилиндрические функции*). Величины

$$N_{lm}(r) = -i \left(\frac{c}{\omega}\right) [\nabla M_{lm}(r)], \quad \tilde{N}_{lm}(r) = -i \left(\frac{c}{\omega}\right) [\nabla \tilde{M}_{lm}(r)],$$

$$M_{lm}(r) = h_l \left(\frac{r\omega}{c}\right) X_{lm}(n), \quad \tilde{M}_{lm}(r) = j_l \left(\frac{r\omega}{c}\right) X_{lm}(n),$$

определяющие электр. и магн. мультипольные поля, выражаются через ортономированные векторные сферич. ф-ции

$$X_{lm}(n) = [l(l+1)]^{-1/2} \hat{L} Y_{lm}(n), \quad (8)$$

к-рые являются собств. ф-циями операторов  $[\hat{L}^2, \hat{L}_z, \hat{S}^2, \hat{J}^2$  и  $\hat{J}_z$ , отвечающими собственным значениям  $l, l(l+1), s(s+1), j(j+1)$  и  $m$  соответственно. Оператор полного момента импульса  $\hat{J} = \hat{L} + \hat{S}$  включает оператор спина фотона  $\hat{S}$ , к-рый действует на векторную ф-цию  $a(r)$  по правилу  $\hat{S}_{pq} a_q = -i \epsilon_{pqr} a_k$ , где  $\epsilon_{pqr}$  — Леви-Чивитта символ, числа  $p, q, k$  принимают значения 1, 2, 3 (но  $k$  — суммирование). Для ф-ций (8)  $s = 1$ , а собств. значения операторов  $\hat{L}^2$  и  $\hat{J}^2$  совпадают:  $j = l$ . Величины

$$L_{lm} = -i \left(\frac{c}{\omega}\right) \nabla \left[ h_l \left(\frac{r\omega}{c}\right) Y_{lm}(n) \right] -$$

продольные «мультипольные потенциалы», к-рые в пункте не дают никакого эл.-магн. поля (в силу его ненулевой спиральности), но сохранены в (4) для полноты разложения.

Используя соотношения

$$\nabla N_{lm} = 0, \quad [\nabla N_{lm}] = -i \left(\frac{\omega}{c}\right) M_{lm},$$

$$\nabla M_{lm} = 0, \quad [\nabla M_{lm}] = i \left(\frac{\omega}{c}\right) N_{lm},$$

$$\nabla L_{lm} = i \left(\frac{\omega}{c}\right) Y_{lm}, \quad [\nabla L_{lm}] = 0,$$

находим фурье-образы электр. и магн. полей  $M. и.:$

$$E(r, \omega) = -\frac{i\pi\omega^2}{c^2} \sum_{l,m} [n_{lm} N_{lm}(r) + m_{lm} M_{lm}(r)], \quad (9)$$

$$B(r, \omega) = \frac{i\pi\omega^2}{c^2} \sum_{l,m} [n_{lm} M_{lm}(r) - m_{lm} N_{lm}(r)].$$

220 Т. о., в источниках (т. е. в области, где  $j = 0, \rho = 0$ ) поля  $M. и.$  распадаются на два типа — электрического

(в них магн. поле перпендикулярно, поскольку  $M_{lm}(r)$  и магнитного (в них поперечно электр. поле). О первых слагаемых (в (9), отвечающих состоянию поля с полным моментом  $j = l$  и чётностью  $(-1)^l$ ), говорят как об электр. 2<sup>l</sup>-польных фотонах, а о вторых слагаемых в (9) с моментом  $j = l$  и чётностью  $(-1)^{j+1}$  — как о магн. 2<sup>l</sup>-польных фотонах. Соответствующие фурье-амплитуды полей этих двух типов задаются набором фурье-компонентов мультипольных моментов  $n_{lm}(\omega)$  и  $m_{lm}(\omega)$ , к-рые определяются свойствами системы или индуцируются внеш. полями (телами).

Мультиполи наз. внешними, если их поля рассматриваются во внешней (по отношению к источникам) области, и внутренними — при рассмотрении их полей внутри системы, но в области, свободной от источников. В области, завитой источниками, такое простое представление невозможно, поскольку амплитуды полей (3), (4) зависят от координат и, кроме того, существенно наличие продольных «мультипольных потенциалов»  $4\pi i(\omega/c) \rho_{lm} L_{lm}$ . Более того, величины (5) — (7) не дают полного описания распределения зарядов и токов в источнике и особенностей их взаимодействия с внеш. полем; в общем случае необходимо ещё задание т. в.  $(2l+1)$ -степенных радиусов распределения плотности заряда и тока. Последние определяются интегралами вида

$$r_q^{2n} = Q^{-1} \int \rho(r, \omega) r^{2n} d^3r \text{ — для заряда } (q),$$

$$r_d^{2n+1} = Q^{-1} \int \rho(r, \omega) r^{2n} d^3r \text{ — для электр. диполя } (d) \text{ и}$$

аналогично для др. мультиполей ( $Q = \int \rho d^3r, n=1,2,\dots$ ).

В отличие от статич. предела ( $\omega = 0$ ) для гармонич. колеблющихся зарядов определение электр.  $n_{lm}$  (но не магн.  $m_{lm}$ ) мультипольных моментов содержит сущест. дополнит. особенность. Интеграл в (6) можно выразить в аквипотенциальной форме, явно выделив зарядовый и токовый вклады:

$$n_{lm} = ic[l(l+1)]^{-1/2} \int \rho(r, \omega) Y_{lm}^*(n) \frac{d}{dr} \left[ r j_l \left(\frac{r\omega}{c}\right) \right] d^3r -$$

$$- \left(\frac{\omega}{c}\right) [l(l+1)]^{-1/2} \int r j(r, \omega) j_l \left(\frac{r\omega}{c}\right) Y_{lm}^*(n) d^3r. \quad (10)$$

Наряду с осциллирующей плотностью заряда [входящей в (10) аналогично случаю электростатики, но с учётом аффектов аналитичности] электр. мультипольный момент формируется также осциллирующей плотностью радиального тока. Это обстоятельство приводит к независимой, новой (по отношению к электр.- и магнитостатике, ср. *Мультиполи*) системе т. в. торонидных мультиполей, простейшим представителем к-рой является аналогия — тор с токами, текущими строго по его меридианам. Согласно (10) и ур-нию непрерывности  $i\omega \rho(r, \omega) = \nabla j(r, \omega)$ , величины торонидных моментов на два порядка по частоте выше, чем зарядовых моментов того же ранга, и на один порядок выше, чем магн. моментов. Магн. мультипольные моменты, как и в магнитостатике, обусловлены полностью поперечного ( $\perp r$ ) тока, напр. в случае тора — токами, текущими по его параллелям. Необходимость введения торонидных моментов, независимых не только от зарядовых, но и от магн. моментов, становится очевидной, если представить плотность тока в виде

$$j(r, \omega) = \nabla \eta(r, \omega) + [\nabla f(r, \omega)]$$

и учесть, что вихревое поле  $f(r, \omega)$  описывается как минимум двумя скалярными ф-циями, напр.:

$$f(r, \omega) = i \hat{L} \Psi(r, \omega) + i \nabla \hat{L} \chi(r, \omega).$$

Торонидные моменты отсутствуют в случае чисто продольного тока ( $\nabla \eta$ ), когда  $f = 0$ , и порождаются той (радиальной) частью тока ( $[\nabla f]$ ), к-рая остаётся неучтён-

ной в (7), где  $\hat{M}_z^* \text{т.г.}$  В статич. пределе ( $\omega \rightarrow 0$ ), когда  $j_l(r_0/c) \sim (r_0/c)^l$  и  $h_l(r_0/c) \sim (r_0/c)^{l+1/2}$ , торсионные мультиполи наряду с магн. мультиполями дают вклад в разложение векторного потенциала  $A(r, \omega)$ , но после взятия операции ротора,  $B = [\nabla A]$ , выживают только магн. мультиполи.

Поля М. и. (9) заданных интенсивности, типа (электрич. или магн.) и мультипольного характера ( $lm$ ) могут генерироваться источниками, заключёнными внутри сферы произвольного, сколь угодно малого радиуса. Для любого распределения плотности вярда-тока

$$\rho_0(r, \omega) \exp(-i\omega t), \quad j_0(r, \omega) \exp(-i\omega t) + \text{const},$$

равного нулю за пределами сферы радиуса  $r_0$ , всегда можно найти др. распределение плотности вярда-тока ( $p_1, j_1$ ), осциллирующее с той же частотой  $\omega$  и равное нулю вне сферы меньшего радиуса  $r_1 < r_0$ , такое, что поле излучения при  $r > r_0$  будет тождественным тому, которое порождалось первонач. источниками [теорема Насимира (H. Casimir)], Следовательно, произвольно узкая угл. диаграмма направленности может быть осуществлена при помощи произвольно малого источника. Однако реализация такой сверхэффективной антенны предполагает создание большого ко-ва когерентных мультиполей равного ранга ( $l$ ) со сравнимой интенсивностью М. и. Последнее весьма затруднительно, по крайней мере для источников, занимающих область малого размера по сравнению с излучаемыми длинами волн,  $r_0 \ll c/\omega$ , поскольку тогда, как правило, порядок величин мультипольных моментов быстро падает с ростом  $l$ :

$$|n_{lm}| \sim (r_0 \omega/c)^{-l} |m_{lm}| \sim ec(r_0 \omega/c)^l.$$

В отличие от электро- и магнитоэлектрич. все пространственные гармоники полей (9) убывают при удалении от источника по одному и тому же закону — обратно пропорционально расстоянию  $r$ . Поэтому все они вносят вклад в мощность излучения  $P$  (на данной частоте  $\omega$ ), проинтегрированную по всем направлениям  $n$ :

$$P = \frac{c^2}{8\pi} \int n \text{Re} \{ EB^* \} d\Omega = 2\pi \frac{c^2}{\omega^2} \sum_{l,m} \left( |n_{lm}|^2 + |m_{lm}|^2 \right).$$

Отсюда видно, что для сосредоточенных источников ( $r_0 \ll c/\omega$ ) с ростом номера  $l$  при прочих равных условиях мощность М. и. убывает как  $r_0^{2l} (\omega/c)^{2l+2}$ . Излучающая система теряет угл. момент, плотность к-рого  $\mu = (8\pi c)^{-1} |r \{ EB^* \}|$ . Угл. момент относительно оси  $z$ , испускаемый в единицу времени, равен

$$\dot{M}_z = 2\pi \frac{c}{\omega} \sum_{l,m} m \left( |n_{lm}|^2 + |m_{lm}|^2 \right).$$

Т. о., каждый фотон М. и. с заданным азимутальным индексом  $m$  уносит, наряду с энергией  $\hbar\omega$ , угл. момент  $m\hbar$ , поскольку  $\dot{M}_z = Pm/\omega$ . Необходимо отметить, что мультипольные поля с заданными значениями полного угл. момента  $j = l$  и типа (электрического или магнитного) не имеют определ. значений спиральности и орбитального момента, поскольку без нарушения условия поперечности свободного эл.-магн. поля невозможно разделение орбитального момента и спина. Последнее связано с калибровочной инвариантностью поля и отсутствием массы у фотона.

В квантовой теории выяснение отношения квадрата излучаемого угл. момента к квадрату энергии при излучении  $N$  квантов в заданной мультипольной ( $lm$ )-моду даёт фактор  $[N^2 m^2 + N(l+1) - m^2] \omega^{-2}$ . В классич. пределе ( $N \gg 1$ ) это приводит к указанному выше значению (в расчёте на 1 квант)  $\dot{M}_z^2/P^2 = m^2 \omega^{-2}$ , но в случае излучения только одного фотона даёт «квантовый ответ»  $(l+1) \omega^{-2}$ , полагающийся для «частицы» в

( $lm$ )-состоянии. Нетривиальность соответствующего перехода заключается в том, что при конечном числе квантов  $N$  когерентно складываются только их  $z$ -компоненты угл. момента (это даёт член  $N^2 m^2$ ), тогда как, согласно принципу неопределённости, две остальные ( $x$ -,  $y$ -) компоненты складываются некогерентно, добавляя член, пропорциональный  $N$ .

Квантовые источники, напр. возбуждённые молекулы, ядра или атомы, испускают фотоны в мультипольных состояниях (или в определ. суперпозиции этих состояний с определ. чётностью, см. Отбора правила). Однако мультипольность ( $lm$ )-фотона не измеряется непосредственно, локально, а требует интегрирования по поверхности, охватывающей источник. Реально детектируемые фотоны обычно представляют собой плоскостовольные состояния с определ. спиральностью. В связи с этим изучение физ. свойств источников фотонов по характеристикам М. и. фактически предполагает проведение преобразования между мультипольными состояниями и наблюдаемыми плоскостовольными состояниями поля, т. е. разложение сферич. векторных волн по плоским волнам. Подобные особенности квантовых измерений важны, напр., при спектроскопич. изучении угл. корреляций ядерных гамма-лучевых каскадов, поскольку в ядрах, в отличие от атомов и молекул, широко распространены переходы высшей мультипольности.

Согласно соответствия принципу, квантомеханич. ф-лы для интенсивности спонтанного М. и. на частоте  $\omega = (\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1)/\hbar$  при переходе квантовой системы с энергетич. уровня  $\mathcal{E}_2$  на уровень  $\mathcal{E}_1$  (т. е. при переходе из стационарного состояния  $\psi_2$  в  $\psi_1$ ) получаются из классич. ф-л для спектральной мощности излучения соответствующей заменой квадратов фурье-компонентов мультипольных моментов  $|m_{lm}(\omega)|^2, |n_{lm}(\omega)|^2$  на квадраты удвоенных матричных элементов  $2 \langle \psi_1 | n_{lm} | \psi_2 \rangle^2, 2 \langle \psi_1 | m_{lm} | \psi_2 \rangle^2$ . Отношение определённой таким образом интенсивности излучения к энергии кванта  $\hbar\omega$  даёт вероятность радиан. перехода в единицу времени. Она складывается из вероятности излучения различных ( $lm$ )-фотонов. При этом (в силу закона сохранения угл. момента) М. и. определённого ( $lm$ )-фотона оказывается возможным, только если начальное и конечное значения угл. момента (и его  $z$ -компоненты) у излучающей системы подчиняются правилам отбора, а изменение чётности состояния системы согласуется с чётностью фотона данного типа [электрического ( $-1$ ) <sup>$l$</sup>  или магнитного ( $-1$ ) <sup>$l+1$</sup> ]. Если при заданном значении величины момента фотона  $l$  его  $z$ -проекция  $m$  (а с ней и  $z$ -проекция момента излучающей системы) не определена, то говорят о М. и. частично поляризованных фотонах. Вероятность индуцированного М. и. ( $lm$ )-фотона (или его поглощения) отдельной квантовой системой определяется умножением вероятности спонтанного М. и. на число  $N$  уже имеющихся в поле фотонах данной ( $lm$ )-моды (см. Вынуждённое излучение). Однако это правило требует уточнения (нелинейного самосогласования) в сильных когерентных полях ( $N \rightarrow \infty$ ), когда квантовая система деформируется фотонами ( $lm$ )-моды и её состояния нельзя рассматривать независимо от поля (см. Нелинейная оптика).

Для атомов и ядер, в  $k$ -рых энергия излучаемого кванта не превышает энергий локон частиц, оценка вероятности спонтанного мультипольного перехода электрич. типа порядка  $l$  даёт

$$\omega^0(l) \sim \frac{2\pi e^2}{\hbar c} \frac{\omega(r_0 \omega/c)^l}{(2l+1)! \Gamma^2}.$$

Для перехода магн. типа вероятность  $\omega^0(l)$  меньше в  $(g\hbar/m_q c r_0)^2$  раз, где  $g$  — эффективный  $g$ -фактор частиц в атомной или ядерной системе ( $g \sim 2$ ),  $e\hbar/2m_q c$  — магнетон Бора для этих частиц,  $m_q$  — масса частицы.

Рамер атомов  $r_0 \sim a_0 Z_0$ , где  $a_0$  — Бора радиус,  $Z_0$  — эфф. заряд ядра; частоты переходов в атомах

таковы, что  $\hbar\omega \lesssim e^2 Z_0^2 a_0$ , т. е.  $\hbar\omega/c \lesssim Z_0/137$ . В результате типичные значения квадрупольные ( $l=2$ ) и магн. дипольные ( $l=1$ ) переходы в атомах приближ. в  $(137/Z_0)^3$  раз менее вероятны, чем электрич. дипольные (разрешённые переходы). Вышше мультиполю, в частности торoidalный диполь (аванпо), играют принципиальную роль лишь для рентг. переходов в атомах тяжёлых элементов. Учёт высших мультиполюлей необходим также при определении влияния внутр. поля на спектры молекулярных кристаллов и при расчёте экзитонных переходов в полупроводниках, где эффективная масса электронов может понижаться на порядок и более.

Рамер атомных ядер  $r_0 \approx 1.2 A^{1/3} 10^{-13}$  см ( $A$  — число нуклонов в ядре), а частоты переходов лежат в широком диапазоне (соответствующие энергии от неск. кэВ до  $\sim 10$  МэВ). При этом обычно  $\hbar\omega/c \lesssim 1$  и  $\omega^m(l) \sim \sim \omega^l(l)/(3A^{1/3})$ , так что, согласно указанной упрощённой оценке, и в ядрах наиб. вероятными должны быть электрич. дипольные переходы с  $l=1$ . Однако благодаря сильному взаимодействию нуклонов, не зависящему от заряда, эти электрич. дипольные переходы часто оказываются подавленными (особенно при малых энергиях  $\hbar\omega$ ). Поэтому радиан. время жизни возбуждённых ядер и их излучение в значит. мере определяются высшими мультиполюльными переходами. В частности, существуют т. н. гигантские резонансы и запрещённые  $\gamma$ -переходы в тяжёлых ядрах.

Если размеры области, занятой источниками, малы по сравнению с падающими ею длинами волн ( $\hbar\omega/c \ll 1$ ), то можно пренебречь эффектами запаздывания и легко осуществить обратное Фурье-преобразование полей (9). В результате М. и. на произвольном расстоянии  $r$  от системы предстает как явная ф-ция времени, задаваемая переменными мультиполюльными моментами. В волновой зоне поперечные ( $\perp r$ ) поля излучения произвольной системы с точностью (по  $\hbar\omega/c$ ) до членов, включающих вклад торoidalного диполя  $T(t)$ , равны

$$B_{kr}(t, r) = c^{-2} r^{-1} \left\{ \ddot{p}_k^e + [\ddot{p}^m]_k + c^{-1} \dot{Q}_{kp}^e n_p + c^{-1} e_{kpq} \dot{Q}_{pi}^m n_q \dot{t}_i + c^{-2} \dot{Q}_{kpq}^e n_p n_q + c^{-1} \dot{J}_k^m \right\},$$

$$E(r, t) = [B(r, t)]$$

(суммирование по повторяющимся индексам). Здесь  $p^e$  и  $p^m$  — векторы электрич. и магн. дипольных моментов,  $Q_{kp}^e$  и  $Q_{pi}^m$  — тензоры электрич. и магн. квадрупольных моментов,  $Q_{kpq}^e$  — тензор электрич. октупольного момента.

Мультиполюльное разложение поля является эфф. средством исследования свойств разл. излучателей, особенно если их размеры малы по сравнению с излучаемыми длинами волн. Представление о М. и. используется не только для скалярного и векторного полей в вакууме [как в (1) — (7)], но и для более сложных тензорных полей (напр., гравитационного) или для полей в сплошных средах, в частности для эл.-магн. поля излучения мультиполюл. движущихся со сверхсветовой скоростью в среде (Черенкова — Ваулова излучение), для поля упругих деформаций в анизотропных кристаллах и т. д.

Лит.: Джекоби Д. К., Классическая электродинамика, пер. с англ. М., 1965; В е р е с т е в и ч и й В. В., Д и ф ф и к и п. Е. М., П и т а е в с к и й Л. П., Квагтовная электродинамика, 3 изд., М., 1989; Д у б о в и ч В. М., Ч е т к о в А. А., Мультиполюльное разложение в классической и квантовой теории поля и излучение, «УФН», 1974, т. 5, с. 791; Г р а у С. G., Multipole expansions of electromagnetic fields using Debye potentials, «Amer. J. Phys.», 1978, в. 46, p. 169; Ф р а н к И. М., Излучение Вавилова — Черенкова для электрических магнитных полюсов, «УФН», 1984, т. 144, с. 251; В и д е н х а р Д., Л у ч и Д ж., Угловой момент в квантовой физике, пер. с англ. т. 2, М., 1984; M ü l l e r E. E., Scalar potentials for vector fi-

elds in quantum electrodynamics, «J. Math. Phys.», 1987, в. 28, p. 2786.

В. В. Кочароский, Ва. В. Кочароский.

**МУТНЫЕ СРЕДЫ** — среды, в к-рых распространение света сопровождается значит. рассеянием, влияющим на условия распространения, вследствие чего нарушается прозрачность среды. Рассеяние света в среде происходит на её опич. неоднородностях, что было установлено Л. И. Мандельштамом в 1907. Среда может быть мутной вследствие неоднородности структуры, наличия в ней посторонних макроскопич. частиц и включений (дымы, туманы, облака, коллоидные растворы). Флуктуации плотности, возникающие из-за тепловых движений частиц, могут привести к резкому увеличению рассеяния, и среда станет сильно мутной (*опалесценция кристаллическая*). Среда может стать мутной при резонансном рассеянии.

В М. с. опич. неоднородности распределены хаотично. Среда, в к-рых опич. свойства изменяются плавно (локально однородные), света не рассеивают: внутри такой среды происходит постепенное искривление световых лучей (*рефракция света*).

Опич. свойства М. с. определяются явлениями ослабления проходящего излучения вследствие рассеяния и поглощения и взаимного излучения разл. объёмов М. с. рассеянным излучением. Взаимное излучение имеет когерентную и некогерентную части. Когерентная часть взаимного излучения неоднородностей ведёт к изменению эфф. эл.-магн. поля, в к-ром оно находится, а следовательно, и рассеянного ими поля. Когерентная часть взаимного излучения и интерференция излучений, рассеянных различными объёмами, относятся к т. н. к о г е р е н т н ы м э ф ф е к т а м, к-рые ведут к когерентной части М. с. с. опич. свойств образующих её частиц. Некогерентная часть взаимного излучения неоднородностей для объёмов среды представляется в форме м и к о г е р е н т н о г о р а с с е я н и я.

Теория рассеяния света в М. с. принципиально не отличается от дифракц. задач электродинамики: при известном выпл. излучения (освещении) и при известном пространственном распределении эл.-магн. свойств М. с. нужно определить поле в нек-рой точке вне или внутри среды.

Эту задачу можно представить состоящей из двух частей: 1) определить поле, рассеянное отд. элементом М. с., предполагая выпл. поле, в к-ром находится «мутный элемент», суперпозицией излучающего поля и поля, создаваемого всеми остальными элементами тела; 2) просуммировать действие всех элементов (частиц) тела (см. *Рассеяние света*).

В большинстве реальных М. с. эту общую задачу удаётся свести к более простым случаям, определяемым соотношением с длиной волны  $\lambda$  след. четырёх линейных величин:  $d$  — расстояния между «элементами» (молекулами, микровключенными) внутри частицы,  $a$  — размера частицы,  $R$  — ср. расстояния между центрами частиц в М. с.,  $R$  — размера М. с. Конкретная задача и метод её решения определяются величинами четырёх безразмерных параметров:  $x_1 = d/\lambda$ ,  $x_2 = a/\lambda$ ,  $x_3 = R/\lambda$ ,  $x_4 = R/\lambda$ . Параметры  $x_1$  удовлетворяют очевидным неравенствам  $x_1 < x_2 < x_3 < x_4$ . Обычно также  $x_1 \ll 1$  и  $x_4 \gg 1$ .

Если параметр  $x_3 \gg 1$ , т. е. расстояние между частицами  $d \gg \lambda$ , то отд. частицы среды рассеивают свет некогерентно. В этом случае задача сводится к анализу однократного рассеяния на частице, к-рое зависит от величин  $x_2$  (размера частицы) и относительного комплексного показателя преломления частицы  $n = n' - ik$ . При очень малых размерах частицы ( $x_2 \ll 1$  и  $|n| \approx 1$ ) наблюдается рэлеевское рассеяние. При этом показат. рассеяния приблизительно  $\propto \lambda^{-4}$ , т. е. сильнее лучч. напр., рассеиваются в 16 раз сильнее, чем красные. Поэтому прямой свет от Солнца кажется красным, а небо — от рассеянного света Солнца — синим.

Более общий случай любых  $x_i$  был рассмотрен А. Лявом (A. Love, 1899) и Г. Ми (G. Mie, 1908) (см. *Ми тео-*

рия). Расчёт светового поля для случая больших  $x_3$  (до  $\sim 10^8$ ) очень сложен и осуществляется на ЭВМ. Однако картина поля, получающаяся из расчётов, хорошо совпадает с той, что следует из простых ф-л геом. оптики.

Если параметр  $x_3 < 1$ , то волны, рассеянные разными частями, уже нельзя считать некогерентными, большую роль начинают играть интерференция между рассеянными волнами («кооперативные эффекты»).

Для М. с., оптическая толщина к-рой  $t$  не мала ( $t = x_3 x_1 x_2 > 1$ ), наряду с однократным важным значением имеет также многократное рассеяние, воспринимаемое как самосвечение среды. В результате мн. рассеяний при прохождении сквозь оптически толстую среду параллельный пучок света превращается в диффузный, источник света сквозь мутный слой не виден. Вследствие статистич. характера этого процесса, оно описывается не напряжённостями полей, а матрицей плотности или Стокса параметрами, аддитивными для некогерентных пучков. Многократное рассеяние описывается также уравн-ем переноса излучения.

Если параметр  $x_3 \ll 1$ , то М. с. можно рассматривать как квазисплошное тело. Этот метод был предложен Дж. Максвеллом-Гарнетом (J. Maxwell-Garnett, 1904) и широко используется в оптике коллоидов, твёрдых тел и др.

Четыре безразмерных параметра, отмеченных выше, достаточны для классификации М. с. в поле бесконечной плоской когерентной волны. Реальные пучки лишь частично когерентны, и их рассеяние зависит ещё от длины когерентности  $r$ , точнее от пятого параметра  $x_5 = r/\lambda$ . Поскольку этот параметр характеризует статистику свойства поля, а оно определяется свойствами источника света и пути, к-рый прошла волна до того, как попала на М. с., то его значение никак не связано с предыдущими четырьмя параметрами. Длина когерентности  $r = \lambda^2/\Delta\lambda$ , где  $\Delta\lambda$  — спектральная ширина излучаемой линии. При учёте частичной когерентности света исследование «кооперативных эффектов» становится особенно сложной задачей.

Лит.: П и Ф р и н К. С., Рассеяние света в мутной среде, М.—Л., 1961; Соколов В. В., Рассеяние света в атмосфере планет, М., 1972. К. С. Шифрин.

М-ЧИСЛО — то же, что Маха число.

МЫШЬЯК (лат. Arsenicum), As, — хим. элемент гл. подгруппы V группы периодич. системы элементов, ат. номер 33, ат. масса 74,9216. В природе представлен одним стабильным нуклидом  $^{75}\text{As}$ . Электронная конфигурация внеш. оболочка  $4s^2 4p^3$ . Энергии последоват. ионизаций равны соответственно 9,82; 18,62; 28,35; 50,1 и 62,6 эВ. Металлик. радиус 0,148 нм, радиусы ионов  $\text{As}^{3-}$ ,  $\text{As}^{3+}$  и  $\text{As}^{5+}$  равны соответственно 0,191, 0,069, 0,047 нм. Значение электроотрицательности 2,20.

При обычных условиях устойчив ч. н. серый  $\alpha$ -As, обладающий ромбоэдрич. кристаллич. структурой с параметрами  $a = 0,4129$  нм и  $\alpha = 54,1^\circ$ . Плотн.  $\alpha$ -As 5,72 г/см<sup>3</sup>. При быстром охлаждении паров М. образуется мягкий жёлтый М. ( $\gamma$ -As) с кубич. кристаллич. структурой, его плотн. 1,97 г/см<sup>3</sup>. Кроме того, известны чёрный аморфный  $\beta$ -As и др. его аморфные формы. При нагревании выше 270 °C все эти формы переходят в  $\alpha$ -As. При давлении 3,6 МПа  $t_{пл} = 817^\circ\text{C}$ . Теплота плавления 21,8 кДж/моль, теплота возгонки 33 кДж/моль. Уд. теплоёмкость 0,326 кДж/(кг·K) (18°C), коэф. термич. линейного расширения  $5,6 \cdot 10^{-6}$  K<sup>-1</sup> (40 °C). Для  $\alpha$ -As уд. электрич. сопротивление 35·10<sup>-8</sup> мкОм·м. Тв. по Бриггелю 1,47 ГПа, по шкале Мооса — 3—4. М. диамантитен. Темп-ра Дебая 224 К.

Обладает ср. хим. активностью, в соединениях проявляет степени окисления —3, +3 и +5. М. — сильный яд, его мн. соединения также сильно ядовиты. М. входит в состав нек-рых баббитов и тигрографических сплавов. М. входит в состав спец. стёкол, напр. чешенского стекла для термометров. Соединения М. с селеном ( $\text{As}_2\text{Se}_3$ ),

теллуrom ( $\text{As}_2\text{Te}_3$ ), индием (InAs) — полупроводниковые материалы, используемые в фотоэлементах, фотозондах и др. Особенно велико значение для полупроводниковой техники арсенида галлия (GaAs), сохраняющего свои электр. свойства в интервале темп-р от минимальных до 500° C. В качестве радиоакт. индикаторов используют искусственно получаемые радионуклиды  $^{75}\text{As}$  (электронный захват,  $T_{1/2} = 80,3$  сут),  $^{74}\text{As}$  (электронный захват,  $\beta^-$ - и  $\beta^-$ -распады,  $T_{1/2} = 17,78$  сут) и образующиеся при облучении М. тепловыми нейтронами  $^{76}\text{As}$  ( $\beta^-$ -распад,  $T_{1/2} = 26,32$  ч). С. С. Бердников.

МЭНЛ — РОУ СООТНОШЕНИЯ — энергетич. соотношения, характеризующие взаимодействие колебаний или волн в нелинейных системах с сосредоточенными или распределёнными параметрами. Эти соотношения в совокупности с законами сохранения энергии и импульса определяют характер нелинейного взаимодействия волн (колебаний) и позволяют рассчитать макс. эффективность преобразователя частоты на реактивной нелинейности.

М.—Р. с. впервые были введены в 1956 Дж. Мэнли и Г. Э. Роу (J. M. Manley, N. E. Rowe) для колебаний в нелинейной реактивной системе с сосредоточенными параметрами, а впоследствии обобщены на волны в нелинейных средах. Их общий вид

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m P_{m,n}}{\omega_m + \omega_n} = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n P_{m,n}}{\omega_m + \omega_n} = 0, \quad (2)$$

где  $\omega_n$  и  $\omega_c$  — частоты исходных колебаний (волн  $m, n$  — целые числа,  $P_{m,n}$  — изменение мощности на комбинац. частоте ( $\omega_m + \omega_n$ )).

Соотношения (1), (2) справедливы для системы с произвольной реактивной нелинейностью. Они наглядно трактуются на квантовом языке. Знаменатели в (1), (2), умноженные на постоянную Планка  $h$ , дают энергию кванта на соответствующей частоте, так что  $|P_{m,n}|/h(\omega_m + \omega_n) = N_{m,n}$  есть число квантов комбинац. частоты. При этом величина  $mN_{m,n}$  представляет собой число квантов частоты  $\omega_n$ , затраченных ( $P_{m,n} > 0$ ) или образованных ( $P_{m,n} < 0$ ) при возбуждении комбинац. частоты. Поэтому соотношение (1) есть закон сохранения числа квантов. В соответствии с природой взаимодействия волн М.—Р. с. означают сохранение числа фотонов, фононов, плазмонов, магнонов или др. взаимодействующих квазичастиц.

Рассмотрим применение М.—Р. с. для наиб. часто встречающегося трёхчастотного взаимодействия (см. Взаимодействие световых волн, Взаимодействие волн в плазме, Параметрическая генерация и усиление электромагнитных колебаний, Параметрический генератор света, Параметрическое рассеяние). Если, напр., выполняется соотношение  $\omega_1 - \omega_c = \omega_p$  ( $\omega_p$  — разностная частота), то в соответствии с (1), (2)

$$\frac{P_{1,0}}{\omega_c} = \frac{P_{1,-1}}{-\omega_c} = -\frac{P_{1,0}}{\omega_p}. \quad (3)$$

Отсюда следуют важные выводы. В случае генерации суммарной частоты  $\omega_n$  ( $P_{1,0} < 0$ ) мощности на частотах  $\omega_c$  и  $\omega_p$  уменьшаются, а усиливается волна суммарной частоты; кванты с частотой  $\omega_c$  и  $\omega_p$ , сливаясь, образуют квант частоты  $\omega_n$ . Однако при возбуждении разностной частоты  $\omega_p$  мощность частоты какнай  $\omega_n$  ( $P_{1,0} > 0$ ), согласно (3), переходит к частотам  $\omega_p$  и  $\omega_c$  ( $P_{1,-1}, P_{1,0} < 0$ ): квант какнай расщепляется на кванты частот  $\omega_c$  и  $\omega_p$ . При этом макс. коэф. преобразования по мощности в возбуждаемую частоту  $\omega_p$

$$\alpha = |P_{1,-1}|/P_{1,0} = \omega_p/\omega_n,$$

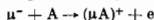
а макс. коэф. усиления на частоте  $\omega_c$

$$\eta = \frac{P_c}{P_{co}} = \left(1 + \frac{\omega_c}{\omega_0}\right) \frac{P_{mc}}{P_{co}}$$

где  $P_{no}$  и  $P_{co}$  — первичная мощность на соответствующих частотах. Т. о., анализ М. — Р. с. для конкретных ситуаций позволяет определить макс. эффективность величинного процесса.

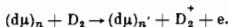
Лит.: M a l e y J. M., R o w e П. E., Some general properties of nonlinear elements, pt 1 — General energy relations, «Proc. IRE», 1956, т. 44, № 7, p. 994; Л и д а у Д. Д., Л и ф ш и н Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; А х м а н о в С. А., О х л о в Р. В., Проблемы нелинейной оптики, М., 1964; Основы теории колебаний, 2 изд., С. М., 1988. С. С. Чиркум.

**МЮ-АТОМНЫЕ ПРОЦЕССЫ** — совокупность реакций, происходящих при образовании и столкновениях мюонных атомов с ядрами атомов вещества. Скорости образования  $\mu$ -атомов весьма велики,  $\sim 10^{12} Z \rho \text{ с}^{-1}$ , где  $\rho = N/N_0$  — относит. плотность вещества,  $Z$  — заряд ядер (в единицах заряда протона) его атомов,  $N_0 = 4.25 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$  — плотность жидкого водорода. Мюонные атомы образуются в реакциях

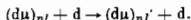


(A — атом) при энергиях мюонов 10—50 эВ и затем за времена  $10^{-12}$ — $10^{-14}$  с переходит в осн. состояние с испусканием  $\gamma$ -квантов и оже-электронов.

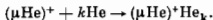
Наиб. изучены  $\mu$ -атомные процессы с участием мюонных атомов изотопов водорода:  $d\mu$ ,  $p\mu$  и  $t\mu$ . Согласно расчётам, они образуются в состояниях с гл. квантовым числом  $l \approx 14$  с вероятностью  $\sim \pi^2$ . При их столкновениях с ядрами др. изотопов возможно след. процессы: перезарядка из возбуждённых состояний  $n$ , напр.  $(d\mu)_n + t \rightarrow (t\mu)_n + d$ , и оже-девозбуждение на уровнях  $n' < n$ :



Сущест. роль в процессах перезарядки играют шариковое смешивание состояний с разл. орбитальными моментами  $l$ , принадлежащих вырожденному мультиплету ( $nl$ ) с фиксиров. значением  $l$ :



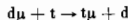
Особый интерес представляет процесс шарикового смешивания  $2s - 2p$  состояний  $\mu$ -атомов водорода  $p\mu$  и гелия  $(\mu\text{He})^+$  в  $k$ -рых эффекты поляризации вакуума снимают вырождение их  $2s$ - и  $2p$ -состояний (см. *Мюонный атом*). Шариковое перемешивание  $2s$ - и  $2p$ -состояний приводит, в частности, к быстрой гибели  $2s$ -состояний за счёт быстрых (скорость  $\sim 10^{13} \times 2^l \text{ с}^{-1}$ ) радц. переходов  $2p \rightarrow 1s$ . Сущест. роль при этом играют процессы образования кластеров типа



Совокупность перечисленных процессов приводит к тому, что все  $\mu$ -атомы водорода и гелия за время жизни мюона успевают перейти в основное  $1s$ -состояние. В этом состоянии возможны упругое рассеяние типа



перезарядка



и др. процессы. Абс. величина этих сечений при малых энергиях столкновения,  $\epsilon \ll 1 \text{ эВ}$ , составляет  $10^{-20}$ — $10^{-19} \text{ см}^2$ , а их зависимость от энергии довольно разнообразна. Напр., в сечении реакции упругого рассеяния  $d\mu + p \rightarrow d\mu + p$  имеет место *Рамзауэра эффект* при  $\epsilon \approx 1,6 \text{ эВ}$ , а при  $\epsilon \approx 50 \text{ эВ}$  — сильный резонанс. Сечение реакции  $t\mu + t \rightarrow t\mu + t$  аномально мало в пределе  $\epsilon \rightarrow 0$ , а в сечении реакций  $d\mu + d$  и  $t\mu + t$  имеются пороговые особенности. Взаимдействие спинового мюона и ядер приводит к расщеплению энергии осн. состояния  $\mu$ -атомов на орто-состояния (спины ядра и мюона параллельны) и пара-состояния (спины анти-

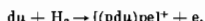
параллельны), энергии  $k$ -рых различны: расщепление на величинах  $\Delta E_{po} = 0,182 \text{ эВ}$ ,  $\Delta E_{do} = 0,049 \text{ эВ}$ ,  $\Delta E_{to} = 0,241 \text{ эВ}$ . Во всех случаях величина расщепления превышает кинетич. энергию  $\mu$ -атомов при нормальной темп-ре ( $\epsilon \approx 0,04 \text{ эВ}$ ), что приводит к необратимым переходам мюонных атомов из орто- в пара-состояние при столкновениях типа



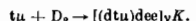
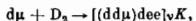
В частности, этот процесс в 4 раза увеличивает наблюдаемую скорость  $\mu$ -захвата  $\mu^- + p \rightarrow p + \nu_e$  в газобразном водороде по сравнению с теоретическими предсказываемой без учёта  $\mu$ -атомных процессов при столкновениях.

В жидком водороде в реакции  $p\mu + H_2 \rightarrow [(p\mu)pe]^+ + e$  успевают образоваться мюонная молекула  $p\mu$ ,  $k$ -рая становится ядром  $k$ -молекулярного комплекса  $\{[(p\mu)pe]^+\}$ . Процесс  $\mu$ -захвата происходит при этом в орто-состоянии мюонной молекулы  $p\mu$ , и его скорость втрое превышает скорость  $\mu$ -захвата для чистой статистической смеси орто- и пара-состояний мюонных атомов  $p\mu$ .

При столкновениях др. мюонных атомов изотопов водорода с молекулами водорода образуются соответствующие мюонные молекулы, т. е. молекулярные ионы, состоящие из двух ядер и  $\mu^-$ ,  $k$ -рые становятся «тяжёлым ядром»  $k$ -молекулярного комплекса. При перезарядке мюонных молекул их энергия связи передаётся электрону конверсия, напр.:



При резонансном образовании мюонных молекул  $d\mu$  и  $t\mu$  энергия их образования передаётся на возбуждение «вращательно-колебат. состояний» ( $\nu K$ ) образующегося  $\mu$ -молекулярного комплекса:



Эти реакции являются ключевыми в последовательности реакций *мюонного катализа*.

Лит.: З е л д о в и ч Я. В., Г е р ш т е й н С. С., Ядерные реакции в холодном водороде, «УФН», 1960, т. 71, с. 581; G e r s t e i n S. S., P o l o m a g e v L. I., Mesomolecular processes induced by  $\mu^-$  and  $p^+$  mesons, в кн.: Muon physics, v. 3, N. Y., 1970. Л. И. Цоколяк.

**МЮЛЛЕРА МАТРИЦА** — матрица линейного преобразования (матричный оператор), применяемая для аналит. описания действия поляризац. оптич. элементов (поляризаторов, фазовых пластин, отражающих поверхностей, тонких плёнок) на произвольном образом поляризованные световые пучки (см. *Поляризация света*). М. м. представляет собой квадратную  $4 \times 4$ -матрицу  $M$ ,  $k$ -рая связывает 4-компонентный вектор Стокса  $S'$  светового пучка, прошедшего через оптич. элемент, с вектором Стокса  $S$  исходного пучка:  $S' = MS$ . Действие совокупности  $k$  оптич. элементов на световой пучок с вектором Стокса  $S$  описывается произведением соответствующих М. м.:  $S' = M_k M_{k-1} \dots M_2 M_1 S$ , причём матрицы элементов, последовательно проходящих световым пучком, располагаются в соответствующей последовательности справа налево. Знание М. м. оптич. элементов, расположенных на пути светового луча, позволяет путём простых формальных преобразований определить поляризац. состояние (вектор Стокса) света, прошедшего через оптич. систему. Метод расчёта эволюции поляризац. состояния света был предложен Х. Мюллером (H. Müller) в 1943 и получил широкое распространение. В отличие от др. расчётных методов (аналитич. Джексона матричного метода, графич. метода сферы Пуанкаре), метод Мюллера применим и к денолирующим системам, поскольку описывает связь между усреднёнными по времени интенсивностями разл. поляризац. компонент пучка, а не между амплитудами и фазами колебаний.

М. м. простейших поляризац. элементов можно определить на основании известных результатов преобразования или нек-рых пробных (известных) типов поляризации. М. м. поляризац. элемента ( $M_0$ ) с произвольным азимутом оси анизотропии ( $\theta$ ) определяется по известной М. м. этого элемента с заданным азимутом (напр., нулевым  $\theta = 0$ ,  $M_0$ ) путём применения матрицы поворота  $R(\theta)$ :  $M_0 = R(\theta)M_0R(\theta)$ , где

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

М. м. могут использоваться и для описания преобразования поляризации света оптич. элементами с зависящими от времени поляризац. характеристиками (напр., при поляризац. модуляции света). При этом элементом соответствующей М. м. также становятся ф-циями времени. М. м. простейших поляризац. элементов за tabулированы и приводятся в монографиях по поляризац. оптике.

В явл. общем виде М. м. для идеального недеполяризующего эллиптич. поляризатора имеет вид

$$M = \frac{1}{2} \times \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \cos \delta & \sin 2\theta \sin \delta \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta \cos \delta & \sin 2\theta \cos 2\theta \sin \delta \\ \sin 2\theta \cos \delta & \sin 2\theta \cos 2\theta \cos \delta & \sin^2 2\theta \cos^2 \delta & \sin^2 2\theta \sin \delta \cos \delta \\ \sin 2\theta \sin \delta & \sin 2\theta \cos 2\theta \sin \delta & \sin^2 2\theta \sin \delta \cos \delta & \sin^2 2\theta \sin^2 \delta \end{pmatrix}$$

Поляризатор пропускает свет с эллиптичностью  $\omega$  ( $\omega_0 = b/a$ ,  $b$  и  $a$  — полуоси эллипса поляризации) и с фазовым сдвигом  $\delta$  между колебаниями по осям выбранной декартовой системы координат (азимут  $\phi$  большой полуоси эллипса поляризации относительно осей этой системы координат определяется выражением  $\tan 2\phi = \tan 2\theta \cos \delta$ ). М. м. для фазовой пластинки с азимутом оси анизотропии  $\phi$ , эллиптичностью нормальных колебаний  $\omega$  и фазовым сдвигом  $\delta$  имеет вид

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & A_1^2 - A_2^2 - A_3^2 + A_4^2 & 2(A_1A_2 + A_3A_4) & -2(A_1A_3 + A_2A_4) \\ 0 & 2(A_1A_2 - A_3A_4) & -A_1^2 + A_2^2 - A_3^2 + A_4^2 & 2(A_1A_4 - A_2A_3) \\ 0 & -2(A_1A_3 - A_2A_4) & -2(A_1A_4 + A_2A_3) & -A_1^2 - A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 \end{pmatrix}$$

Здесь введены обозначения:  $A_1 = \cos 2\theta \cos 2\phi \sin \delta / 2$ ,  $A_2 = \cos 2\theta \sin 2\phi \sin \delta / 2$ ,  $A_3 = \sin 2\theta \sin \delta / 2$ ,  $A_4 = \cos \delta / 2$ . Приведённые выражения для М. м. произвольного поляризатора и фазовой пластинки позволяют решать большое число задач преобразования поляризации света без учёта деполяризации.

Литм. Шерклиф У., Поляризованный свет, пер. с англ., М., 1965; Джеррард А., Вёрч Дж. М., Введение в матричную оптику, пер. с англ., М., 1978; Азаам Р., Башара Н., Ближнеометрия и поляризованный свет, пер. с англ., М., 1981; В. С. Залесский.

**МЮ-МЕЗОНЫ** — устар. название мюонов. К классу мезонов не относятся, являются лептонами.

**МЮНИИ** ( $\mu$ ) — связанное состояние электрона ( $e^-$ ) и положительно заряженного мюона ( $\mu^+$ ), водородоподобный атом, в к-ром роль ядра играет мюон. Изучение М. имеет важное значение для физики элементарных частиц и атомной физики, т. к. он является одной из простейших систем двух точечных заряд. частиц — лептонов, взаимодействие к-рых с хорошей точностью описывается квантовой электродинамикой (др. системой такого рода является позитроний). С др. стороны, измерение поляризации М. в разл. веществах стало основой нового, весьма эфф. метода исследования структуры конденсиров. сред, кинетич. явлений и хим.

реакций, фазовых превращений и др. (см. Мюонной спиновой релаксации метод).

Экспериментально М. был открыт в 1960 В. Хьюзом (V. W. Hughes) и др. Свободный М. в осн. состоянии может быть образован путём захвата атомного электрона положит. мюоном. Сначала этот процесс наблюдался в инертных газах при низком давлении. Обнаружение М. в др. средах осложняется высокой кин. активностью М., к-рый может рассматриваться как лёгкий изотоп водорода. Впервые М. в конденсиров. средах наблюдался в 1966 В. Г. Фирсовым и др.

М. является метастабильной системой вследствие распада мюона (за счёт слабого взаимодействия) на позитрон ( $e^+$ ) и два нейтрино ( $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ ) со временем жизни  $\tau \approx 2.2 \cdot 10^{-6}$  с. В результате исчезновения М. сопровождается испусканием позитрона с макс. энергией ок. 53 МэВ, двух нейтрино и низкоэнергетич. электрона.

Из-за эффектов несохранения чётности в слабом взаимодействии мюоны, возникающие от распада л-мезонов ( $\mu^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ), поляризованы (в направлении, противоположном их импульсу), а позитроны в распадах мюонов обладают асимметрией в угл. распределении по отношению к направлению спина мюона. При кулоновском захвате электрона поляризов. мюоном образуются поляризов. атомы М. с неравной населённостью уровней *сверхтонкой структуры*. Изменение этих населённостей во внеш. магн. поле может быть обнаружено по изменению в угловых распределениях позитронов распада.

М. впервые обнаружен по наблюдению характерной частоты ларморовской прецессии в магнитном поле  $f_{L\mu} \approx \mu_B H \approx 1,40 \cdot 10^6 H$  МГц ( $\mu_B = eh/2m_e c$  — магнетон Бора,  $m_e$  — масса электрона,  $H$  — напряжённость магн. поля). Для свободного мюона ларморовская частота  $f_{L\mu} \approx 2\mu_B^+ H/h \approx 13,5 \cdot H$  кГц примерно в сто раз меньше, где нормальный магн. момент мюона  $\mu_B^+ = eh/2m_\mu c$  ( $m_\mu$  — масса мюона).

В низшем приближении взаимодействие электрона и мюона — чисто кулоновское, и перелятивистское ур-вие Шрёдингера приводит к такому же выражению для уровней энергии М., как для атома водорода:

$$W_n = -\frac{R_\infty}{n^2} \left(1 + \frac{m_e}{m_\mu}\right)^{-1},$$

где  $n = 0, 1, 2, \dots$  — гл. квантовое число,  $R_\infty$  — постоянная Ридберга. Т. к. спины электрона и мюона равны  $1/2$ , то в S-состояниях квантовое число полного угл. момента М. может принимать два значения:  $F = 1$  и  $F = 0$ . Взаимодействие магн. моментов электрона и мюона вызывает сверхтонкое расщепление уровней энергии М., характеризуемых этими двумя значениями F. Соответствующий интервал сверхтонкой структуры в осн. состоянии М. ( $n = 1$ ) в первом приближении дается ф-лой Ферми (1939):

$$\Delta W_F = \frac{\Delta W_F}{h} = \frac{16}{3} \alpha^2 c R_\infty \frac{\mu_B}{m_\mu} \cdot \frac{\mu_B}{m_e} \left(1 + \frac{m_e}{m_\mu}\right)^{-3} \approx 4459 \text{ МГц},$$

$$\mu_B = \mu_B^+ (1 + a_\mu),$$

где  $a_\mu$  — аномальный магнитный момент мюона ( $\mu_B, \mu_B^+$  — магн. моменты мюона и протона,  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры).

Релятивистское ур-вие для волновой ф-ции системы двух дираковских частиц и аппарат квантовой электродинамики позволяют вычислять поправки к уровням энергии М. в виде разложения по степеням малых параметров  $\alpha$  и  $m_e/m_\mu$ . Однако коэф. этого разложения содержит также зависимость от логарифмов этих параметров. В результате теоретич. значения интервала сверх-

тонкого расщепления в основном  $1S$ -состоянии  $M$ . можно представить в виде

$$\Delta\nu_{\text{теор.}} = \Delta\nu_F(1 + a_0 + \alpha^2 A + \alpha^2 B(\ln\alpha) + \alpha \frac{m_e}{m_\mu} \left[ C \left( \frac{m_e}{m_\mu}, \ln \frac{m_e}{m_\mu} \right) + \alpha D \left( \ln \frac{m_e}{m_\mu}, \ln\alpha \right) \right]). \quad (2)$$

В этом выражении  $\Delta\nu_F$  дается равенством (1),  $a_0$  — аномальный магн. момент электрона в единицах  $\mu_B$ , коэф.  $A$  и  $B$  характеризуют вклад релятивистских и чисто радиат. эффектов в пределе бесконечной массы мюона, т. е. при  $(m_e/m_\mu) \rightarrow 0$ , коэф.  $C$  и  $D$  связаны с квантово-волектродинамик. эффектами отдачи (конечности массы) мюона. Используя известные выражения для коэф.  $A, B, C, D$ , принятых значений фундам. констант  $R_\infty, c, \alpha, \mu_B/\mu_N$ , а также значений отношений  $\mu_B/\mu_P = 3,18334547(95)$  и  $m_p/m_e = 206,768259(62)$  дается теоретич. значение

$$\Delta\nu_{\text{теор.}} = 4463,3047(19) \text{ МГц.} \quad (3)$$

Тонкая и сверхтонкая структура уровней энергии  $M$ . полностью аналогична структуре уровней атома водорода. В частности, лямбовский сдвиг в  $M$ . (разность уровней  $2S_{1/2} - 2P_{1/2}$ ) составляет

$$l_{\text{теор.}}^{M\mu} = 1047,03 \text{ МГц.} \quad (4)$$

Величину сверхтонкого расщепления осн. уровня  $M$ . удаётся очень точно измерить, помещая  $M$ . во внеш. статич. магн. поле. При этом вследствие *Зеемана эффекта* в основном  $1S$ -состоянии возникает система уровней, определяемая ф.-л. Брейта — Раби (1931):

$$W_{F=1, v; M_F} = -\frac{\Delta W}{4} + \frac{1}{2} g_{\text{осн}}(M\mu) M_F \pm \pm \frac{\Delta W}{2} [1 + 2M_F + \alpha^2]^{1/2}, \quad (5)$$

$$x = \left[ g_{\text{осн}}(M\mu)_{\mu_B} - g_{\text{осн}}(M\mu)_{\mu_N} \right] \frac{H}{\Delta W}, \quad \Delta W = \hbar \Delta\nu,$$

где магн. квантовое число  $M_F = -1, 0, 1$  для  $F = 1$  и  $M_F = 0$  для  $F = 0$ ,  $g_{\text{осн}}(M\mu)$  — электронное и мюонное гиромагн. отношение в  $M$ . Идея эксперимента состоит в индуцировании магн. дипольных переходов между уровнями с разными  $M_F$  с помощью источника микроволнового излучения. Происходящие переходы детектируются по изменениям в углу распределения позитронов от распада мюонов. Резонансные переходы наблюдались в широком интервале внеш. магн. полей от очень слабых,  $H < 2$  МГс, до сильных,  $H \sim 10$  кГс, и при разл. давлениях инертного газа от неск. атм до десятков атм.

Эксперим. значение интервала сверхтонкого расщепления осн. уровня  $M$ . получается из соотношения (5) после экстраполяции к нулевому давлению газа и составляет

$$\Delta\nu_{\text{эксп.}} = 4463,30288(16) \text{ МГц.} \quad (6)$$

Указанное значение  $\Delta\nu$  найдено из одновременных измерений переходов  $\nu_{12}$  и  $\nu_{21}$  в магн. поле  $13,6$  кГс. Из этих же данных можно найти приведенное выше значение  $\mu_B/\mu_P$ . Прекрасное согласие теоретич. и эксперим. значений  $\Delta\nu$  в  $M$ . свидетельствует о справедливости квантовой электродинамики и релятивистской теории связанных состояний, а также о самосогласованности определения значений фундам. физ. констант. Наличие неск. частот переходов с  $\Delta M_F = 1$  в  $M$ . приводит к двухчастотной прецессии спина мюона в магн. поле, открытой И. И. Гуревичем и др. и широко используемой при исследовании хим. свойств конденсиров. сред ( $\mu SR$ -спектроскопия). В 1984 впервые была измерена величина лямбовского сдвига уровней с  $n = 2$  в  $M$ :

$$L_{\text{эксп.}}^{M\mu} = 1060(15) \text{ МГц.}$$

Проводятся поиски превращения  $M$ . в антимюоний, т. е.  $(\mu^+e^-) \rightarrow (\mu^+e^+)$ ,  $K$ -роэ свидетельствовало бы о нарушении сохранения электронного и мюонного лептонных чисел, ожидаемом в нек-рых совр. теориях элементарных частиц.

Литм.: В а б а в а А. И. и др., Наблюдение атомарного мюона в кристаллическом кварце. «Известия АН УССР», 1966, т. 3, с. 3; Гуревич И. И., Никольский В. А. Двухчастотная прецессия  $\mu^+$ -мезона в атоме мюония, «УФН», 1976, т. 119, с. 169; Hughes V. W., Kinoshita T., Electromagnetic properties and interactions of muons, в кн.: Muon physics, ed. by V. W. Hughes, C. S. Wu, v. 4, N. Y., 1977; Вегелер J. H., Строек К. М., Advances in muon spin rotation, «Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.», 1978, v. 28, p. 239; Hughes V. W., Pritchard G. Z., Muonium has not yet decayed, «Comm. Nucl. Part. Phys.», 1984, v. 12, p. 259.

**МООННОЙ СПИНОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ МЕТОД** (метод МСР) — исследование физ.-хим. свойств материалов и поведения в веществе примесных частиц с помощью положит. мюонов, имплантируемых в изучаемые объекты. Метод МСР сформировался в 1960—70-х гг. в ходе экспериментов по проверке разл. вариантов теории слабого взаимодействия. В зарубежной литературе часто используется назв.  $\mu SR$ , по аналогии как аббревиатура слов muon spin rotation (relaxation, resonance).

Метод МСР базируется на законе несохранения пространственной четности при распаде пи-мезонов ( $\pi$ ) и мюонов ( $\mu$ ):

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Несохранение четности при распаде пи-мезонов позволяет получать на ускорителях пучки мюонов со степенью поляризации, близкой к 100%, а несохранение четности при распаде мюонов даёт возможность следить за направлением магн. моментов мюонов, регистрируя позитроны  $\mu \rightarrow e$ -распада, поскольку позитроны вылетают преим. вдоль спина мюона. Суть метода МСР заключается в наблюдении за изменением во времени поляризации ансамбля мюонов, возникающим из-за магн. взаимодействия мюонов, заторможенных в веществе, со средой.

**Применение метода МСР.** Исследования можно разделить на 2 группы: изучение явлений, где анализируется поведение в веществе самого положит. мюона  $\mu^+$ , рассматриваемого как лёгкий протон; изучение проблем, где  $\mu^+$  рассматривается как простейший зонд в исследуемом веществе, сочетающий свойства пробного заряда и элементарного магнетометра. Часто в одном эксперименте оба аспекта тесно переплетаются. Примеры исследований 1-й группы — эксперименты по изучению электронной структуры мюония в полупроводниках и диффузии мюонов в металлах. Эти эксперименты дополняют исследование поведения водорода в материале, позволяя получать наглядную картину процессов, в к-рых проявляется квантовая природа поведения лёгкой примесной частицы в тяжёлой кристаллич. решётке. Примерами исследований 2-й группы может служить изучение смешанного состояния *сверхпроводников* 2-го рода и фазовых переходов с изменением магн. порядка (см. *Магнитный фазовый переход*).

**Особенности метода МСР:** 1) в методе МСР отсутствует необходимость в сильных магн. полях для создания заметной поляризации мюонов, что позволяет изучать явления, сильно искажаемые внеш. полем (напр., фазовые переходы в *стичных стеклах*); 2) изменение поляризации детектируется без приложения электрич. ВЧ-поля, что снимает ограничения, связанные со *скин-эффектом*; 3) для получения МСР-спектра необходима регистрация большого кол-ва актов распада мюонов  $\sim 10^6$  (ср. время жизни мюона  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с); т. к. плотность мюонов в образце в любой момент времени исчезающе мала, то при интерпретации эксперим. данных можно пренебречь взаимодействием мюонов между собой.

Схема эксперимента. Пучок позитронов, мюонов  $\mu^+$  проходит через *цифталлационные детекторы*  $D_1, D_2$  и  $D_3$  (рис. 1), тормозится и останавливается в исследуемом образце — мишени  $M$ . Деполаризация пучка мюонов на стадии торможения практически не происходит (время торможения  $< 10^{-10}$  с). Позитроны распада регистрируются детекторами  $D_3$  и  $D_4$ . Момент остановки мюона  $t_0$  определяется совпадением сигналов с детекторов  $D_1$  и  $D_2$  при условии отсутствия сигнала с детектора  $D_3$  (1, 2, 3). Время вылета позитрона  $t_p$  определяется по схеме совпадений сигналов с  $D_3, D_4$  при отсутствии сигнала с  $D_2$  (3, 4, 5). Интервалы  $t_0 - t_p$ , представляющие собой индивидуальные времена взаимодействия отл. мюонов со средой, кодируются и записываются в многоканальное запоминающее устройство (см. Памяти устройства). Составленная т. о. гистограмма временных интервалов описывается выражением:

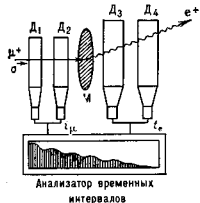


Рис. 1. Схема МСР-эксперимента.

$$N(t) = N_0[1 + aP(t)]\exp(-t/\tau_0). \quad (1)$$

Здесь  $\tau_0$  — ср. время жизни мюона,  $a$  — экспериментально определяемый коэф. асимметрии, величина  $P(t)$  определяется временной зависимостью ср. значения распределения проекций мюонных спинов  $\sigma_x$  на ось детектора позитронов. Выражение (1) является следствием  $V - A$  теории слабого взаимодействия, определяющей энергетич. и угл. распределения позитронов  $\mu \rightarrow e$ -распада. Среднее по энергии позитронов значение коэф. асимметрии  $a$  в соответствии с  $V - A$  теорией равняется  $1/2$ . Однако в действительности знак и величина  $a$  определяются особенностями формирования пучков мюонов, энергетич. порогом регистрации позитронов и геометрий позитронного телескопа (детекторы  $D_3, D_4$ ).

Временная зависимость  $P(t)$ , измеряемая в разл. условиях (тем-ра образца  $T$ , внеш. магн. поле, давление), служит в методе МСР осн. источником экстрим. информации. Диапазон характерных времён, исследуемых непосредственно по МСР-гистограмме, определяется величиной  $\tau_0$ , временным разрешением регистрирующей аппаратуры и её стабильностью. Практич. диапазон составляет  $10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$  с. С помощью модельных представлений изучаются эффекты с характерными временами  $t \geq 10^{-12}$  с. Напр., на зависимость  $P(t)$  заметно отражаются осцилляции магн. моментов электронов в парамагнетиках.

По способу приложения внеш. пост. магн. поля исследования принято разделять на 3 группы: эксперименты в поле, перпендикулярном нач. поляризации мюонов ( $H \perp \sigma_0$ ); в нулевом поле ( $H = 0$ ); в поле, параллельном по отношению к поляризации ( $H \parallel \sigma_0$ ). Эксперименты в поле  $H \perp \sigma_0$ . Если к кристаллич. образцу, в междоузлиях которого локализуются мюоны, приложено пост. поле  $H \perp \sigma_0$ , то при отсутствии внутр. магн. полей в образце (см. Внутрикристаллическое поле)  $P(t)$  определяется соотношением

$$P(t) \sim \cos(\omega t).$$

Здесь  $\omega = eH/mc$  — частота ларморовской прецессии спина мюона. Внутр. магн. поля изменяют характер зависимости  $P(t)$ . Если эти поля направлены случайным образом, слабо меняются за время жизни мюона  $t_0$  и малы по сравнению с  $H$ , то:

$$P(t) \sim \exp(-\delta^2 t) \cos(\omega t).$$

Величина  $\delta^2$  характеризует деполаризацию (релаксацию)  $\sigma_x$  в связи с распределением локальных магн.

полей на мюон. Процесс деполаризации имеет гауссовский вид и объясняется нарушением фазовой когерентности в прецессии спинов отл. мюонов. Если локальные магн. поля, действующие на отл. мюоны, становятся переменными во времени, то процесс деполаризации замедляется, и при достаточно быстром изменении полей релаксация приобретает экспоненциальный вид

$$P(t) = \exp(-2\delta^2 t) \cos(\omega t).$$

Величина  $\tau^{-1}$  характеризует частоту изменения локального магн. поля на мюонах. Изменение локальных полей возникает как за счёт флуктуаций внутр. магн. полей, так и за счёт диффузии мюонов. В МСР-экспериментах часто используются понятие скорости релаксации — величины  $\Lambda$ , обратной времени, за к-рое поляризация мюонов уменьшается в  $e$  раз.

На рис. 2 представлены данные, полученные при изучении диффузии мюонов в поликристаллич. образце меди. Анализ зависимости скорости релаксации  $\Lambda$  от  $T$  позволил обнаружить эффект подбарьерного тунелирования мюонов (см. Туннельный эффект). При диффузии мюоны перемещаются по междоузлиям решётки и вклады локальных полей в поворот спинов отл. мюонов усредняются. Эффект усреднения тем сильнее, чем чаще смена полей на мюонах. Поэтому при ускорении диф-

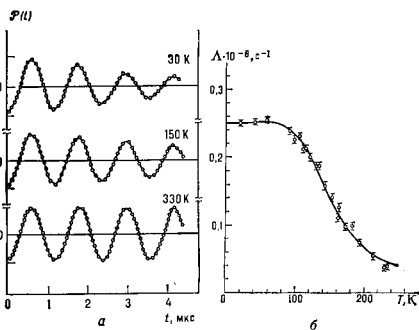


Рис. 2. Изучение диффузии  $\mu^+$  в меди: а — временные зависимости МСР-сигнала  $P(t)$ ; б — зависимость скорости релаксации  $\Lambda$  от  $T$ .

фузии с ростом тем-ры  $T$  величина  $\Lambda$  уменьшается, а при замедлении — увеличивается. В области плато мюоны можно считать локализованными. В ходе диффузии происходит подбарьерное тунелирование мюонов. При  $T \sim 100 - 200$  К ср. время  $t$  пребывания частицы в междоузлии хорошо описывается зависимостью:

$$\tau^{-1} = \nu_0 \exp(-\theta/T) = \nu_0 Z \exp(-e\sqrt{um\delta^2/\hbar^2}) \exp(-\theta/T),$$

где  $\nu_0$  — частота нулевых колебаний частицы в междоузлии ( $\sim 10^{13}$  с $^{-1}$ ),  $Z$  — число ближайших междоузлий; экспоненциальный множитель, не зависящий от  $T$ , определяет вероятность тунелирования под барьером высотой  $u$  и шириной  $\delta$ ,  $e$  — коэф. ( $\sim 1$ ), определяемый формой потенци. барьера,  $m$  — масса мюона,  $\theta$  — энергия, необходимая для переноса локальной деформации решётки яря переходе мюона из одного междоузлия в другое (см. Полярон),  $\theta \ll u$ . Для меди  $f = (7,61 \pm 0,04)$  с $^2$ ,  $\theta = (562 \pm 17)$  К. Величина  $u$  для мюона составляет 4000 К.

Скорость релаксации  $\Lambda$  зависит от симметрии мест локализации мюонов в решётке, расположения кристал-



лографич. осей относительно  $H$  и от выхода у ядер решётки квадрупольного электрического моментов.

Мюоний ( $Mu$ ). При торможении в веществе положит. мюоны, подхватывая электроны, образуют связанное состояние ( $\mu^+e^-$ ), подобное атому водорода. В большинстве случаев вещество такой атом живёт слишком малое для регистрации время ( $\sim 10^{-11}$  с), т. к. мюон попадает в окружение частиц со сложными электронными спинами. Однако в вен-рых полупроводниках и диэлектриках атом  $Mu$  живёт достаточно долго и может быть обнаружен.

Осн. состояние мюония в общем случае является суперпозицией 4 состояний, отвечающих разл. комбинациям спинов электрона и мюона. Правила отбора по магн. квантовому числу приводят к тому, что в выражение  $P(t)$  для поперечного магн. поля входят 4 частоты. Зависимость  $P(t)$  упрощается, если внеш. поле  $H$  мало по сравнению с полем, создаваемым магн. моментом мюона на связанном электроне. В этом случае две частоты, близкие по величине частоте сверхтонкого расщепления  $\omega_0$ , определяемой плотностью волновой ф-ции электрона на мюоне в системе ( $\mu^+e^-$ ), обычно не детектируются (в вакууме  $\omega_0 \approx 4463$  МГц). Оставшиеся 2 частоты могут быть зарегистрированы.

На рис. 3 показана т. н. двухчастотная прецессия спина мюона в кварце:

$$N(t) = N_0 \exp(-t/\tau_{M\mu}) [1 + aP(t)];$$

$$P(t) = \frac{1}{2} \exp(-t/\tau_{M\mu}) \cos \Omega t \cdot \cos \omega t.$$

Здесь  $\tau_{M\mu}$  — ср. время жизни связанного состояния ( $\mu^+e^-$ ) в кварце ( $\sim 1,5 \cdot 10^{-6}$  с),  $\omega$  — частота ларморов-

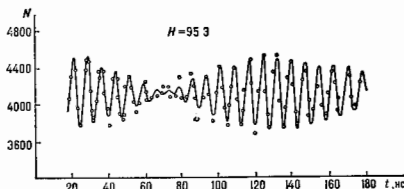


Рис. 3. «Двухчастотная» прецессия спина мюона в плавленном кварце.

ской прецессии мюония,  $\Omega = \omega^2/\omega_0^2$ . Измеренное в кварце значение  $\omega_0$  практически совпадает с величиной сверхтонкого расщепления для мюония в вакууме. Для мн. полупроводников  $\omega_0$  заметно отличается от вакуумного. В Ge и Si обнаружено по 2 типа связанных состояний ( $\mu^+e^-$ ).

Эксперименты при  $H = 0$  и  $H \parallel \sigma_z$ . На рис. 4 показан вид зависимости  $P(t)$ , измеренной в сверхпроводящем состоянии сплава  $Nb_3Al$  при диле-дильном взаимодействии мюонов с ядрами решётки в отсутствие диффузии мюонов. Внеш. поле  $H$  в образце полностью отсутствует из-за *Мейснера эффекта*. Релаксация обусловлена взаимодействием мюонов с магн. моментами ядер кристаллич. решётки. Эксперим. зависимость описывается ф-цией Кубо — Тойба:

$$P(t) = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} (1 - \delta^2 t^2) \exp(-\delta^2 t^2/2),$$

при выводе к-рой предполагается гауссовский закон распределения внутр. магн. полей в местах локализации мюонов со средн.квадратичным отклонением  $\sqrt{\langle \Delta H^2 \rangle}$ :

$$\delta^2 = \frac{1}{3} \left( \frac{z}{mc} \right)^2 \langle \Delta H^2 \rangle.$$

плавный выход на значение  $1/2$  при  $t \rightarrow \infty$  — объясняется прецессией спинов первоначально поляризованных мюонов в поперечных, постоянных во времени магн. полях, описываемых гауссовским распределением. Найденное в  $Nb_3Al$  значение величин  $\delta$  соответствует среднеквадратичной величине поля на мюоне  $\sqrt{\langle \Delta H^2 \rangle} = 8,2$  Э.

Метод нулевого поля используется для изучения медленных процессов замещения локальных полей на мюонах. Зависимость  $P(t)$  в случае  $H = 0$  более чувствительна к малым значениям  $t$ , чем в случае  $H \perp \sigma_z$ , а также в тех случаях, когда возмущающее воздействие внеш. поля является фактором, разрушающим изучаемое явление.

До 1988 года  $H \parallel \sigma_z$  обычно использовались для того, чтобы замедлить и сделать наблюдаемыми процессы быстрой деполаризации мюонов за счёт взаимодействия с электронами среды. Дальнейшим развитием метода МСР послужили эксперименты по определению расщепления энергетических уровней мюона в веществе, напр. при взаимодействии с квадрупольными моментами ядер решётки (см. *Ядерный квадрупольный резонанс*). Когда энергия аземановского расщепления для мюона при увеличении  $H$  сравнивается с суммой аземановской энергии ядра и энергии квадрупольного расщепления, становится возможным взаимный переворот спинов мюона и ядра ( $H \uparrow - H \uparrow$ ). При этом деполаризация резко ускоряется. Зависимость скорости релаксации  $\Lambda$  от внеш. поля  $H$  носит резонансный характер.

Технические средства. Метод МСР используется практически на всех ускорительных, имеющих пучки поляризов. мюонов низких энергий, в т. ч. на всех *мюонных фабриках*. Современная МСР-установка — автоматизиров. система, управляемая ЭВМ. Мюоны и позитроны регистрируются телескопами сцинтилляц. детекторов. Позитронные телескопы обычно два — вдоль и против хода пучка продольно-поляризов. мюонов. Логика идентификации мюонов и позитронов призвана выделять истинные события распада из стохастич. потоков мюонов пучка и позитронов при наличии фонового частиц. Использование мюонитящих *пропорциональных камер* для определения координат точки распада мюона позволяет исследовать весь, образов. одновременно и практически полностью подавить искажение МСР-спектров, возникающие из-за регистрации позитронов от распада мюонов, оставшихся в не исследуемого образца, и фона.

Наряду с регистрацией и кодированием времён жизни отд. мюонов, на пучках с импульсной структурой используется т. н. аналоговый съём информации. С детектора, регистрирующего интегральный спектр позитронов от всех мюонов одного импульса (обычно *черенковский счётчик*), снимается сигнал, форма к-рого кодируется и заносится в память ЭВМ. Итоговая гистограмма получается суммированием сигналов от отд. «пачек» мюонов (такой способ не накладывает ограничений на интенсивность пучков мюонов).

На импульсных пучках мюонов выполняются также стробоскопич. эксперименты и эксперименты в скрещенных магн. полях ( $H \perp \sigma_z$  и  $H \parallel \sigma_z$ ). Стробоскопич. способ основан на поиске резонанса в зависимости интегрального счёта позитронов от внеш. магн. поля. Резонанс наблюдается при совпадении частоты ларморовской прецессии спина мюона с частотой следования «пачек» мюонов. Эксперименты в скрещенных полях но-

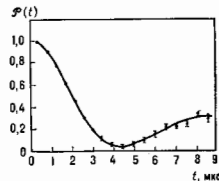


Рис. 4. Релаксация спина мюона в сверхпроводящем состоянии сплава  $Nb_3Al$ .

сат резонансный характер и подобны методу ядерного магнитного резонанса.

Эксперименты с  $\mu^-$  затруднены из-за конкуренции процесса  $\mu$ -захвата.

Лит.: Мезоны в шестиде. Труды Международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезонно-нуклонных процессов в веществе. Дубна, 7—10 июля, 1977 г., Дубна, 1977; Muon spin rotation. Proceedings of the International Conferences, Switzerland, 1978, «Hyperfine Interactions», 1978, v. 6, № 1—4; Б е л о у с о в Ю. М. и др., Исследование металлов с помощью положительных мюонов, «УФН», 1979, т. 129, с. 3; К и р и л о в В. Г., У р о м о в В. П., Н и к и т и н Ю. П., С е р г е е в Ф. М., Атомы и мезоны, М., 1980; MSR-2, Vancouver, Canada, 1980, «Hyperfine Interactions», 1981, v. 8, № 4—6; G i r o u e t t e H. J., N i k o l a y A., Investigation of matter with positive muons, «Adv. Ser. High Energy Physics Reviews», 1983, v. 3, p. 89; MSR-3, Shimoda, Japan, 1983, «Hyperfine Interactions», 1984, v. 17—19, № 1—4; K a r l s s o n E., The use of positive muons in metal, in: «Muons and pions in materials research», Amsterdam, 1984, S. 11 и т. д.; Muon spin rotation spectrometer, Bristol, 1985; MSR-4, Uppsala, Sweden, 1986, «Hyperfine Interactions», 1986, v. 31, № 1—4; Труды Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом, Дубна, 1987.

И. И. Гуревич, А. Н. Пономарев.

**МЮОННЫЙ АТОМ** (мю-нуклонный атом) — атомодобная система  $Z\mu$ , состоящая из атомного ядра и отрицательно заряженного мюона ( $\mu^-$ ), к-рая, как правило, содержит ещё неск. электронов. Свойства  $M. a.$  подобны свойствам обычного *водородоподобного атома* с зарядом ядра  $Z$ , а некоторые различия обусловлены отличием массы  $\mu^-$  от массы электрона  $m_e$ :  $m_\mu = 206,769m_e$ . Поэтому характерные размеры  $M. a.$   $a_n = h^2/m_\mu e^2 Z \approx 2,6 \cdot 10^{-11} Z^{-1}$  см. Это примерно в 200 раз меньше размеров обычных атомов, и при  $Z \approx 50$  они становятся даже меньше размеров ядра. Напр., радиус ближайшей к ядру орбиты  $\mu^-$  в  $M. a.$  свинца почти в 2 раза меньше, чем радиус ядра Pb, т. е.  $\mu^-$  ося часть времени проводит внутри ядра. Это позволяет использовать свойства  $M. a.$  для изучения распределения электр. заряда по объёму ядра.

В отличие от *атомных атомов* пребывание  $\mu^-$  в ядре не приводит к исчезновению  $M. a.$  (захвату мюона ядром), поскольку *мюоны* взаимодействуют с нуклонами ядер значительно слабее, чем *атроны*. Поэтому время жизни  $M. a.$  определяется временем жизни свободного мюона  $\tau_\mu = 2,2 \cdot 10^{-6}$  с. Однако с увеличением заряда ядра *слабое взаимодействие* мюона с ядром возрастает. Для лёгких элементов вероятность захвата мюона ядром  $[Z + \mu \rightarrow (Z - 1) + \nu_\mu]$  растёт пропорционально  $Z^4$  и уже при  $Z \approx 10$  сравнивается с вероятностью распада свободного мюона. При больших  $Z$  рост вероятности  $\mu$ -захвата замедляется, а при  $Z = 70-90$  время жизни  $M. a.$   $\tau \sim 10^{-7}$  с, т. е. примерно в 20 раз меньше  $\tau_\mu$ .

$M. a.$  образуются при захвате мюонов кулоновским полем ядра  $Z$ . При этом из электронной оболочки атома выбивается один или неск. электронов (обычно внешних).  $M. a.$  образуются вначале в возбуждённых состояниях и за время порядка  $10^{-11}-10^{-13}$  с переходит в осн. состоянии, освобождая энергию в виде рентгеновских и  $\gamma$ -квантов или передавая её оже-электронам. Измеряя энергию радиац. переходов в тяжёлых  $M. v.$ , можно получить информацию о распределении зарядов в ядре, а также о его размерах и форме. Иногда возможны беззлучательные переходы с передачей энергии на возбуждение ядра.

Компактная система  $Z\mu$  для внеш. электронной оболочки эквивалентна ядру с зарядом  $Z - 1$ , т. е. при захвате мюона кулоновским полем к-л. ядра, напр. Ne, образуется  $M. a.$   $Z\mu$  с алектронной оболочкой соседнего атома F. Взаимодействие сильное  $\mu^-$  и алектрона из оболочки атома фтора в магн. поле позволяет проследить судьбу этого атома и даёт возможность измерять абс. скорость хим. реакции изоэров. атома F (см. *Мезонная химия*).

Наиб. изучены простейшие  $M. a.$  именно  $M. a.$  гелия He и водорода пр. Радиус орбиты  $\mu^-$  в них сравним с комптоновской длиной волны электрона  $\lambda/m_0 c$  (т. е. в 200 раз меньше радиуса боровской орбиты электрона), поэтому для них эффекты *поляризации вакуума*

и обусловленный ими *лаэмбовский сдвиг*  $\Delta E_{\text{Л}}$  весьма значительны ( $\Delta E_{\text{Л}} = 1,38$  эВ для He и  $\Delta E_{\text{Л}} = 0,202$  эВ для пр. для атома H  $\Delta E_{\text{Л}} = 0,44 \cdot 10^{-6}$  эВ).

$M. a.$  изотопов водорода пр,  $d\mu$  и  $t\mu$  отличаются от др.  $M. a.$  своей нейтральностью, благодаря к-рой, а также благодаря своей малости они подобно нейтронам свободно проникают сквозь электронные оболочки атомов и при столкновениях с их ядрами участвуют в многочисл. мезоатомных процессах. Особый интерес вызывает совокупность процессов в смеси дейтерия и трития, в к-рой благодаря явлению *мюонного катализа* один мюон за время жизни  $\tau_\mu$  может осуществить  $\sim 150$  реакций синтеза ядер дейтерия и трития по схеме  $\mu^- \rightarrow t\mu \rightarrow dt\mu \rightarrow \text{He} + t + \mu^- + 17,6$  МэВ, освобождая при этом ок. 150 нейтронов и энергию  $\sim 2,5$  ГэВ.

Лит.: Баркоп Э., Экзотические атомы, пер. с англ., «УФН», 1972, т. 106, с. 527; К и м Е., Мезонные атомы и ядерная структура, пер. с англ., М., 1975; К и р и л о в В. Г., У р о м о в В. П., Н и к и т и н Ю. П., С е р г е е в Ф. М., Атомы и мезоны, М., 1980; Экзот. атомы, N. У.—Л., 1980; Б е т т и С. Д. Ж., Экзотические атомы, «СЧА», 1982, т. 13, с. 164.

**МЮОННЫЙ КАТАЛИЗ** — явление синтеза (слияния) ядер изотопов водорода, происходящее при суств. участии отрицательно заряж. мюонов. Мюоны, образуя с ядрами мезомолекулы, способствуют сближению ядер на расстояния, достаточные для протекания ядерной реакции. Освобождаясь после акта реакции,  $\mu^-$  могут повторить этот процесс (т. е. они выступают в качестве катализатора).

В отсутствие мюонов реакции синтеза, напр. ядер дейтерия  $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + p$  или ядер дейтерия и трития  $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ , происходят с заметной вероятностью лишь при высоких энергиях  $\approx$  сталкивающихся частиц,  $E \approx 1-10$  кэВ, т. е. при темп-рах в десятки и сотни млн. градусов, поскольку ядрам нужно путём туннельного перехода преодолеть высокий барьер кулоновского отталкивания, чтобы сблизиться до расстояний действия ядерных взаимодействий ( $r_N \approx 5 \times 10^{-13}$  см) (рис. 1). При торможении отрицательно заряж. мюонов в плотной смеси изотопов водорода за вре-

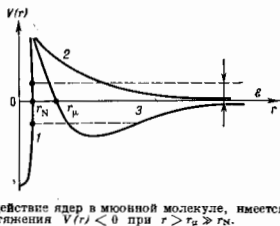


Рис. 1. Схематическое изображение потенциальной энергии  $V$  взаимодействия ядер в зависимости от расстояния  $r$  между ними: 1 — сильное притяжение на малых расстояниях  $r_N$ ; 2 —  $r_\mu$ ; 3 — кулоновское отталкивание на больших расстояниях; 4 — взаимодействие ядер в мюонной молекуле, вынесет область притяжения  $V(r) < 0$  при  $r > r_\mu \approx r_N$ .

мя  $10^{-12}$  с образуются *мюонные атомы* пр,  $d\mu$  и  $t\mu$ . Из-за малых размеров и электронейтральности мезоатомов водорода ведут себя подобно нейтронам: они свободно проникают сквозь электронные оболочки атомов и подходят на близкие расстояния к их ядрам. При этом происходит многообразные  $\mu$ -атомные и  $\mu$ -молекулярные процессы: перхват мюонов ядерными более тяжёлых изотопов  $p\mu + d \rightarrow d\mu + p$ ,  $d\mu + t \rightarrow t\mu + d$ ; образование мюонных молекул  $d\mu + p \rightarrow p\mu$  и т. д. Образование мюонных молекул является решающим условием протекания  $M. k.$  В принципе (благодаря экранировке кулоновского поля ядра мюонов в мезоатоме водорода и значит. уменьшению ширины кулоновского барьера) реакции синтеза могли бы протекать на лету, т. е. при столкновениях свободных мезоатомов с ядрами изотопов водорода (напр.,  $d\mu + p \rightarrow {}^3\text{He} + \mu^-$ ,  $d\mu + d \rightarrow {}^4\text{He} + t + \mu^-$  и др.). Однако в мюонных молекулах ядра «улавливаются» друг от друга на расстоянии порядка удвоенного боровского радиуса мезоатома  $2r_\mu \sim 5 \cdot 10^{-11}$

см, что в соти раз меньше ср. расстояния между ядрами в жидком и газообразном водороде ( $\sim 4 \cdot 10^{-8}$  см). Поэтому частота столкновений ядер, приводящих к подбарьерному переходу и реакции синтеза в мюонных молекулах, напр.  $p\bar{d}\mu \rightarrow {}^3\text{He} + \mu$ ,  $d\bar{d}\mu \rightarrow {}^3\text{He} + n + \mu$ , в млн. раз больше, чем в реакции на лету. Особовидший  $\mu^-$  вновь может образовывать мезоатом и повторить ещё раз всю цепочку реакций  $d\bar{d} + p \rightarrow p\bar{d}\mu \rightarrow {}^3\text{He} + \mu$  и т. д. В принципе число таких реакций ограничено лишь временем жизни мюона  $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$  с. Однако в действительности почти всегда  $\mu^-$  в процессе реакции «прилипает» к образовавшемуся ядру гелия  $p\bar{d}\mu \rightarrow \mu^+{}^3\text{He}$  и в дальнейшем выпадает из цикла последоват. реакций, приводящих к синтезу ядер. Эта реакция «отравления катализатора» не столь существенна при синтезе ядер дейтерия  $d\bar{d}\mu \rightarrow {}^3\text{He} + n + \mu$ , в к-рой только 12% мюонов «прилипает» к ядру  ${}^3\text{He}$  по реакции  $d\bar{d}\mu \rightarrow \mu^+{}^3\text{He} + n$ . Ещё меньше мюонов ( $\sim 0,6\%$ ) «прилипает» к ядру  ${}^4\text{He}$  в реакции  $d\bar{t}\mu \rightarrow \mu^+{}^4\text{He} + n$ .

На возможность реакции синтеза в мюонной молекуле  $p\bar{d}\mu$  указал в 1947 Ф. Франк (F. Frank). В 1954 Я. В. Зельдович выполнил первые расчёты этого процесса, включая механизм образования мюонных молекул, согласно к-рому  $\mu$ -атом водорода при столкновении с ядром атомарного водорода связывается в мюонную молекулу путём передачи энергии связи мезомолекулы атомному электрону (именно такою механизмом образования мезомолекул  $p\bar{r}\mu$ ,  $p\bar{d}\mu$ ,  $t\bar{d}\mu$ ). Одновременно он указал на то, что наличие в мезомолекулах возбуждённых уровней с малой энергией связи может приводить к существ. увеличению вероятности их образования. В 1957 Л. Альварес (L. W. Alvarez) и др. впервые экспериментально обнаружили реакции М. к.  $p\bar{d}\mu \rightarrow {}^3\text{He} + \mu$  и  $d\bar{d}\mu \rightarrow T + p + \mu$ . К пач. 80-х гг. М. к. ядерных реакций синтеза в водороде и дейтерии был хорошо изучен как экспериментально, так и теоретически.

Мезоатомные и мезомолекулярные процессы, составляющие последовательности реакций М. к., отличаются большим разнообразием. Одно из таких явлений — резонансное образование мезомолекул  $d\bar{d}\mu$  — наблюдалось впервые группой В. П. Джелелова в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (Дубна) в 1964—66. В 1967 Э. А. Весман предложил объяснение этому явлению, предположив у мезомолекул  $d\bar{d}\mu$  наличие слабосвязанного вращательно-колебат. состояния  $J = v = 1$  (где  $J$  и  $v$  — вращат. и колебат. квантовые числа) с энергией  $\epsilon_{11} \approx -2$  эВ (указание на возможность существования такого состояния было получено С. С. Герштейном в 1958). Это состояние действительно было обнаружено в 1973 в расчётах группы Л. И. Пономарева в Дубне (в настоящее время энергия этого состояния известна с большой точностью:  $\epsilon_{11} = -1,975$  эВ).

В 1977 в результате теоретич. расчётов та же группа обнаружила у мезомолекулы  $d\bar{t}\mu$  слабосвязанное вращательно-колебат. состояние ( $J = v = 1$ ) с энергией  $\epsilon_{11} = -0,657$  эВ. Благодаря наличию такого состояния мезомолекулы  $d\bar{t}\mu$  должны образовываться резонансным образом с большой скоростью (в конденсиров. среде за время  $\sim 10^{-8}$  с). В 1979 этот вывод был подтверждён экспериментально группой В. П. Джелелова и В. Г. Зинова и др. Теоретич. представления о резонансном характере образования мезомолекул  $d\bar{t}\mu$  надёжно обоснованы в экспериментах группы С. Джонса (S. Johns, Лос-Аламос, 1983), в к-рых измерена резонансная скорость  $\lambda_{d\bar{t}\mu} \approx 3 \cdot 10^8$  с $^{-1}$  образования  $d\bar{t}\mu$ -молекул, а также её зависимость от темп-ры смеси.

В резонансном процессе  $t\bar{d} + D_2 \rightarrow [(d\bar{t}\mu)e]_{v,J}$  мезоатом  $t\bar{d}$ , приближаясь к одному из ядер молекулы  $D_2$ , объединяется с ним в мезомолекулу  $d\bar{t}\mu$ , к-рая становится твёрдым «ядром» мезомолекулярного комплекса  $[(d\bar{t}\mu)e]$  в возбуждённом колебательном ( $v$ ) и вращательном ( $J$ ) состоянии, а выделяющаяся при

этом энергия связи мезомолекулы передаётся на колебания и вращение мезомолекулярного комплекса.

Группа Джонса наблюдала в жидкой смеси дейтерия и трития  $180 \pm 20$  циклов М. к., к-рые осуществляет один мюон по схеме, представленной на рис. 2 (где  $\lambda_{d\bar{t}} \sim$

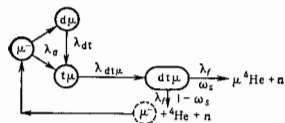


Рис. 2.

$\sim 10^{12}$  с $^{-1}$  — скорость образования  $d\bar{t}\mu$ - и  $t\bar{d}\mu$ -атомов,  $\lambda_{d\bar{t}} \approx 3 \cdot 10^8$  с $^{-1}$ ,  $\lambda_{t\bar{d}} \geq 4 \cdot 10^8$  с $^{-1}$ ,  $\lambda_f \approx 10^{12}$  с $^{-1}$  — скорость ядерного синтеза в мезомолекуле,  $\omega_\mu = 0,58 \cdot 10^{-2}$  — вероятность «прилипания  $\mu^-$  к ядру»). Число циклов катализа  $x_c$  приближённо равно:

$$x_c^{-1} \approx \omega_\mu + \frac{\lambda_{c\bar{c}\mu}}{\lambda_{d\bar{t}\mu} \omega_\mu} + \frac{\lambda_c}{\lambda_{d\bar{t}\mu} \omega_\mu},$$

где  $c_d$  и  $c_t$  — концентрации дейтерия и трития в смеси ( $c_d + c_t = 1$ ),  $\omega_\mu$  — плотность смеси в единицах  $N_0 = 4,25 \cdot 10^{23}$  ядер/см $^3$ ,  $\lambda_0 = 0,46 \cdot 10^9$  с $^{-1}$  — скорость распада свободного мюона. Т. о., в плотной смеси дейтерия и трития один  $\mu^-$  может осуществить до 170 циклов катализа и освободить при этом  $\sim 3$  ГэВ энергии и  $\sim 170$  нейтронов.

Вывод о высокой эффективности М. к. в дейтерий-тритиевой смеси позволил рассмотреть разл. возможности использования этого явления для производства ядерной энергии и нейтронов. Первую схему мюон-катализатора гибридного реактора рассмотрел Ю. В. Петров в 1979. В этой схеме предлагается увеличивать энерговыделение в реакции  $d\bar{t}\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + p + \mu$  с 17,6 МэВ путём дальнейшего разминирования нейтронов с энергией 14,1 МэВ в урановом blankets при делении ядер урана,  $n + {}^{235}\text{U} \rightarrow \text{осколки}$ , и образования ядер плутония,  $n + {}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$ . Предварит. оценки показывают, что такая гибридная система может оказаться экономически эффективной в ядерной энергетике будущего. Интенсивные исследования М. к. продолжают во многих лабораториях мира.

Лит.: Зельдович Я. В., Герштейн С. С., Ядерные реакции в холодном водороде, «Физи.» 1960, т. 71, с. 581; Gerstein S. S., Ponomarev L. I., Mesomolecular processes induced by  $\mu^-$  and  $\pi^-$  mesons, in: Muon physics, v. 3, ed. by V. W. Hughes, C. S. Wu, N. Y., 1975; П о н о м а р е в Л. И., Мюонный катализ ядерных реакций синтеза, «Природа», 1979, № 9; Петров Ю. В. Гибридные ядерные реакторы и мюонный катализ, там же, 1982, № 4; V r a c c i L., Fiorentini G. G., Mesic molecules and muon catalysed fusion, «Phys. Repts», 1982, v. 80, p. 182; Л. И. Пономарев, Л. И. Пономарев, МООННЫ (устар. мю-мезоны;  $\mu^-$ ) — заряженные элементарные частицы со спином  $1/2$ , временем жизни  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с, массой, приблизительно в 207 раз превышающую массу электрона (в энергетик. единицах ок. 105,7 МэВ); относятся к классу лептонов. Отрицательно заряженный ( $\mu^-$ ) и положительно заряженный ( $\mu^+$ ) М. являются частицей и античастицей по отношению друг к другу.

Открытие. М. были впервые обнаружены в космических лучах (1936—37) К. Андерсоном (С. D. Anderson) и С. Неддермейером (S. H. Neddermeier). Вначале М. пытались отождествить с частицей, к-рая, согласно гипотезе Х. Юкавы (H. Yukawa), является переносчиком ядерных сил. Однако такая частица должна была бы интенсивно взаимодействовать с ядрами, тогда как опытные данные показывали, что М. слабо взаимодействуют с веществом. Об этом свидетельствовали сам факт обнаружения М. на уровне моря: частицы, обладающие сильным взаимодействием, должны были бы практически полностью поглотиться в атмосфере Земли. Этот «парадокс» был разрешён в 1947 после открытия  $\pi$ -

мезонов, обладающих свойствами частицы, предсказанной Юкавой и распадающейся на  $M$  и нейтрино:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ,  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ .

Источники. Осн. источником  $M$  в космос. лучах на ускорителях высоких энергий является распад  $\lambda$ -мезонов (пионов) и  $K$ -мезонов (каонов), интенсивно рождающихся при столкновениях адронов (напр., протонов) с ядрами вещества. Др. источником  $M$  могут быть, напр., процесс рождения пар  $\mu^+ \mu^-$  фотонами высоких энергий, распады гиперонов, очарованных частиц. На уровне моря  $M$  образуют осн. компоненту ( $\sim 80\%$ ) всех частиц космич. излучения. На соар. ускорителях высокой энергии получают лучки  $M$  с интенсивностью до  $10^8$ — $10^9$  частиц в 1 с.

Поскольку спин мюонного нейтрино  $\nu_\mu$ , воапключающего вместе с  $\mu^+$ , ориентирован против направления импульса  $\nu_\mu$ , а спин мюонного антинейтрино  $\bar{\nu}_\mu$ , возникающего вместе с  $\mu^-$ , — в направлении импульса  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $M$ , образуясь от двухчастичных распадов  $\pi \rightarrow \mu \nu$ ,  $K \rightarrow \mu \nu$ , имеют «вынужденное» направление спина, определенное законами сохранения импульса и угл. момента: спин  $\mu^+$  от распада покоящихся пионов и каонов по каналу  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ,  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  направлен против импульса  $\mu^+$ , а спин  $\mu^-$  в направлении его импульса. Этот факт проверен прямыми экспериментами. В др. реакциях (напр.,  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \nu_\mu$ ,  $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_\mu$ ) ориентация спина  $M$  противоположна «вынужденной» в соответствии с тем, что в слабом взаимодействии с заряженными токами  $\mu^-$  входит с отрицательной, а  $\mu^+$  с положительной спиральностью.

Т. к. пионы практически полностью распадаются по каналу  $\pi \rightarrow \mu \nu$ , а для заряж. каонов реакция  $K \rightarrow \mu \nu$  происходит с вероятностью 63,5% (вероятность распада  $K \rightarrow \mu \nu$  составляет ок. 3%), то в зависимости от кинематич. условий образования  $M$  и экспериментального их выделения (а также от спектра пионов и каонов) они оказываются частично или полностью поляризованными в направлении своего импульса ( $\mu^-$ ) или против него ( $\mu^+$ ).

При импульсах пионов  $p_\pi \geq (m_\pi^2 - m_\mu^2)/2m_\mu \approx 39,3$  МэВ (в системе единиц, в к-рой  $c = 1$ ) все образующиеся в распаде  $\pi \rightarrow \mu \nu$   $M$  летят в переднюю (относительно импульса пиона) полусферу ( $m_\pi$  — масса частицы  $\pi$ ). М. от распада ультрарелятивистских пионов ( $E_\pi \gg m_\pi$ ) летят в лаб. системе а узком конусе с углом раствора  $\theta_{\max}$ , определяемым условием

$$\sin \theta_{\max} = (m_\pi^2 - m_\mu^2)/2m_\mu p_\pi \approx 0,039/p_\pi$$

(где импульс пиона  $p_\pi$  выражен в ГэВ). При этом  $M$  равномерно распределены по энергии в области от  $(E_\mu)_{\min} \approx E_\pi(m_\pi/m_\mu)^2 \approx 0,57 E_\pi$  до  $(E_\mu)_{\max} \approx E_\pi$ , т. е. ве могут иметь энергию меньше 0,57  $E_\pi$ . М. вблизи верх. края спектра ( $E_\mu \approx E_\pi$ ) вылетают в системе покоя пиона в направлении его импульса (и имеют соответствующий пологит, спиральность для  $\mu^-$  и отрицательную для  $\mu^+$  в лаб. системе), в то время как М. вблизи ниж. границы спектра ( $E_\mu \approx 0,57 E_\pi$ ) вылетают (в системе покоя пиона) против его импульса и имеют в лаб. системе противоположные значения спиральности. Используя эти анализ, можно, т. о., экспериментально выделить  $M$  с любыми значениями спиральности.

### Взаимодействия мюонов

Мюонное число.  $M$  обладают универсальным электрослабым взаимодействием и вместе с мюонным нейтрино составляют «второе поколение» лептонов  $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$

[вряду с первым  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$  и третьим  $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$ ]. Лептоны, входящие в разл. поколения, отличаются лептонными числами (электронным, мюонным,  $\tau$ -лептонным), сохраняющимися с высокой степенью точности (хотя в не-

к-рых теоретич. моделях и предсказывается возможность их нарушения). О сохранении мюонного числа свидетельствует, напр., отсутствие на опыте процессов  $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$  и  $\mu^- \rightarrow e^- e^+ e^-$  (на уровне, меньшем соответственно  $5 \cdot 10^{-11}$  и  $2,4 \cdot 10^{-12}$  от вероятности всех др. распадов  $M$ ), а также отсутствие процессов  $\mu^- A Z \rightarrow e^- A Z$  и  $\mu^- A Z \rightarrow e^- A Z_\pm$  для ряда ядер с зарядом  $Z$  (в единицах элементарного заряда  $e$ ) и массовым числом  $A$  (на уровне, меньшем соответственно  $6 \cdot 10^{-12}$  и  $3 \cdot 10^{-10}$ ), к-рые могли бы происходить в случае несохранения мюонного числа.

Отсутствие аномальных взаимодействий. Экспериментально не обнаружено наличие у  $M$  к.-л. аномальных (отличных от универсального электрослабого) взаимодействий. Одним из сильных (косвенных) эксперим. ограничений на отсутствие аномальных взаимодействий  $M$  является измерение с очень высокой точностью его магн. момента:

$$\mu_\mu = 1,001165924(9) \frac{e\hbar}{2m_\mu c}$$

Полученное значение согласуется с предсказаниями квантовой электродинамики и указывает, что размер  $M$  меньше  $10^{-16}$  см (см. *Аномальный магнитный момент*). Поиск аномальных взаимодействий  $M$  активно проводился в связи с теоретич. попытками объяснить за счет таких взаимодействий большое различие масс  $M$  и эл.тронов при универсальности их слабых и эл.-магн. взаимодействий (т. н. проблема  $\mu$ -е-универсальности). После открытия новых поколений фермионов ( $\tau$ -лептона и тяжелых кварков) указанная проблема перешла в общую проблему поиска механизма, обуславливающего возникновение масс лептонов и кварков. В теоретич. моделях, согласно к-рым массы лептонов и кварков возникают благодаря взаимодействию с Хиггса бозонами, различие в массах связывается с неуниверсальностью этого взаимодействия.

Взаимодействие мюонов с нейтральными токами. Универсальный характер электрослабого взаимодействия  $M$  и др. лептонов с нейтральными токами подтверждается прямыми экспериментами по распадам  $Z^0$ -бозона,  $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $e^+ e^-$ , и косвенными измерениями нарушения зеркальной и зарядовой симметрии в процессах  $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $\tau^+ \tau^-$  на встречных электрон-позитронных пучках, а также в рассеянии поляризованных  $\mu^\pm$  на ядрах (в этих процессах происходит интерференция эл.-магн. взаимодействия и слабого взаимодействия, обусловленного обменом  $Z^0$ -бозоном).

Взаимодействие мюонов с заряженными токами.  $\mu^-$  -  $p$  и  $e^-$  -  $d$ . Распад  $M$  происходит благодаря слабому взаимодействию токов  $(\nu_\mu \mu)$  и  $(\nu_e e)$ :

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu, \quad \mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu. \quad (1)$$

Тип нейтрино, испускаемых в распаде  $M$ , определяется законом сохранения лептонных чисел  $M$  и эл.тронов. Он подтверждается прямыми нейтринными экспериментами. Так, в экспериментах с мюонными нейтрино высоких энергий наблюдался обратный  $\mu$ -распад, идущий по схеме  $\nu_e \mu^- \rightarrow \mu^- \nu_e$  на электронах вещества (порог этой реакции в лаб. системе ок. 10 ГэВ), и не наблюдалось рождения  $M$  в пучке мюонных антинейтрино. (Последняя реакция должна была бы происходить, если бы в распаде  $\mu^-$  хотя бы частично испускалось мюонное антинейтрино, напр. происходила бы реакция  $\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$ .) С др. стороны, как показывает эксперимент на мезонной фабрике, нейтрино от распада  $\mu^+$ , остающаяся в веществе, рождают в детекторе электроны (в результате реакции  $\nu_e A Z \rightarrow e^- A Z_+$ ) и не рождают позитронов (к-рые могли бы возникать от реакции  $\nu_e A Z \rightarrow e^+ A Z_-$ ). Тем самым доказывается, что в распаде  $\mu^+$  возникает электронное нейтрино  $\nu_e$  (и не рождается антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ ). Одновременно получаются также эксперим. ограничения сверху на вероятности переходов  $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$  и  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ . Дос-

тнгиута в экспериментах точность позволяет утверждать, что вероятность распада по каналу  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$  (если он существует) составляет во всяком случае менее 5% от вероятности распада по каналу (1). Все наблюдаемые характеристики распада М. (1) [спектр электронов (позитронов), асимметрия их вылета относительно направления спина М. и её энергетич. зависимость, продольная и поперечная поляризация электронов (позитронов)] полностью согласуются с (V-A)-вариантом слабого взаимодействия *заряженных токов* ( $\nu_{\mu e}$ ) и ( $\nu_{e\mu}$ ). Полная вероятность ( $\Gamma_0$ ) распада М. по каналу (1) в единицу времени, равная абсолютной времени жизни М. в вакууме  $\tau_\mu$ , определяется (в единицах  $\hbar = c = 1$ ) выражением

$$\Gamma_0 = \frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2}{192\pi^3} \frac{m_\mu^5}{m_e^5} \quad (2)$$

где  $G_F$  — константа универсального (V-A)-взаимодействия (константа Ферми), а  $\tau_\mu = 2,19709(5) \cdot 10^{-6}$  с. Распад М. (1) с участием одних только лептонов даёт уникальную возможность наиб. точного эксперим. нахождения константы Ферми. Сравнение константы Ферми, определённой из распада М., с константами полупереходных распадов с изменением *странности* позволяет найти угол смешивания кварков (в частности, *Кабиббо угол*). Величина  $G_F$  была использована также для предсказания масс промежуточных векторных бозонов  $W^\pm, Z^0$ . Для определения  $G_F$  с точностью лучшей, чем 1%, необходимо учитывать *радиационные поправки* к процессу (1) за счёт виртуальных фотонов.

Для полностью поляризованного М. ( $\bar{P} = 1$ ) без учёта релакс. поправок

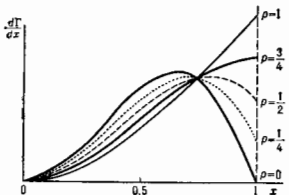
$$\frac{d^2\Gamma}{d\Omega dE} = \frac{\Gamma_0}{2\pi} [(3-2e) \pm \cos\theta(2e-1)] e^2. \quad (3)$$

Спектр электронов (позитронов) получается из (3) интегрированием по телесному углу  $d\Omega$  и имеет вид

$$\frac{d\Gamma}{dE} = 2\Gamma_0(3-2e)e^2. \quad (4)$$

(В общем случае произвольного четырёхфермионного взаимодействия этот спектр характеризуется т. н. параметром Мишеля  $\rho$ ). Наиб. вероятным оказывается вылет электронов (позитронов) с максимально возможными значениями импульса (рис. 1).

Рис. 1. Энергетический спектр электронов (позитронов)  $\mu^-$  —  $e^-$  распада.



Асимметрия вылета  $e^+(e^-)$  относительно спина М., согласно (3), зависит от их энергии. В области высоких энергий ( $e \sim 1$ ) угл. распределение определяется фактором  $(1 \pm \cos\theta)$ , в то время как для низких энергий ( $e \ll 1$ ) — фактором  $(1 \pm \frac{1}{2}\cos\theta)$ . Т. о., асимметрия имеет разный знак для высоко- и низкоэнергетич. областей спектра. Усреднение (3) по спектру даёт:

$$\frac{d\Gamma}{d\Omega} = \frac{\Gamma_0}{4\pi} (1 \pm \frac{1}{2}\cos\theta). \quad (5)$$

Знак усреднённой по спектру асимметрии совпадает со знаком асимметрии в высокоэнергетич. области спектра, т. к. в ней содержится большая доля электронов (позитронов). Указанные закономерности качест-

венно объясняются учётом спиральности частиц в распадае (1). Макс. энергии  $e^+(e^-)$  отвечает кинематика распада (1), когда оба нейтрино образуются с одинаковыми и параллельными импульсами. В этом случае их суммарный спин равен нулю, и из сохранения момента следует, что электрон, имеющий отрицат. спиральность, должен в осн. вылетать в направлении, противоположном спину  $\mu^+$ , а позитрон, имеющий положит. спиральность, — в направлении спина  $\mu^+$  (рис. 2, а, б). Если энергия  $e^+(e^-)$  много меньше энергий  $\mu$ -распада,

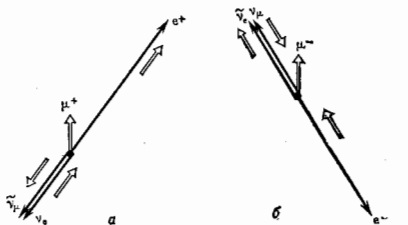


Рис. 2. Схематическое изображение распада  $\mu^+$  (а) и  $\mu^-$  (б) для энергии электронов (позитронов) вблизи верхней границы спектра; тонкие стрелки — направление импульсов частиц, двойные — направление их спина.

то нейтрино должны двигаться с приблизительно равными и противоположно направленными импульсами. В этом случае их суммарный спин равен 1 и направлен вдоль импульса  $\nu_\mu$  в распадае  $\mu^+$  и против импульса  $\bar{\nu}_\mu$  в распадае  $\mu^-$ . Сохранение момента требует в этой ситуации, чтобы импульс  $e^+$  был прем. направлен против спина  $\mu^+$ , а импульс  $e^-$  — вдоль спина  $\mu^-$  (рис. 3, а, б).

Рис. 2 и 3 наглядно демонстрируют нарушения зеркальной (P) и зарядовой (C) симметрий в процессах  $\mu^\pm$ -распадов. О первом свидетельствует наличие асим-

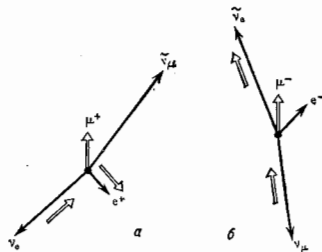


Рис. 3. То же, что на рис. 2, вблизи нижней границы спектра  $e^+$  (а) и  $e^-$  (б).

метрии вылета электрона (позитрона) относительно плоскости, перпендикулярной спину М., а о втором — разл. знак этой асимметрии в распадах  $\mu^+$  и  $\mu^-$ . Вместе с тем очевидно выполнение комбинационной (CP) симметрии: распад  $\mu^-$  выглядит как отражённый в зеркале распад  $\mu^+$  (при отражении в плоскости, перпендикулярной спину, его направление не меняется, а перпендикулярная плоскости компонента импульса меняется на противоположную).

Существование асимметрии вылета позитронов относительно спина М. в  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распаде позволяет по измерению угл. распределения электронов определить поляризацию М., и её изменение со временем, происходящее, напр., в результате прецессии спина М. во внеш.

магн. поле (или в локальных магн. полях в веществе), образования мюония, его хим. реакций в веществе и т. д. На этой основе создан оригинальный метод изучения вещества и кинетики явлений (т. н.  $\mu\text{SR}$ -метод), существенно дополняющий такие классич. методы, как ЯМР, ЭПР, нейтронография.

Согласно  $(V - A)$  теории, электроны (позитроны) от распадов  $M$ . должны обладать продольной поляризацией  $P_{e^+} = -P_{e^-} = v/c \approx 1$  [ $v$  — скорость  $e^{\pm}$  (с<sup>2</sup>)]. Этот факт подтвержден экспериментально (с точностью ~6%). Проводились поиски поперечной поляризации  $e^{\pm}$  в распаде  $M$ . Наличие такой поляризации свидетельствовало бы о присоед. др. вариантов слабого взаимодействия, отличных от  $(V - A)$ . При этом обнаружение поляризации  $e^{\pm}$  (с<sup>2</sup>), перпендикулярной плоскости, в  $K$ -р-ой лежат спин  $M$  и импульс  $e^{\pm}$  (с<sup>2</sup>), явилось бы доказательством нарушения  $T$ -инвариантности (см. *Обращение времени*). Эксперимент показывает отсутствие такой поляризации, установленная для неё верхний предел на уровне ~2%.

$\mu - z$  а т а т. Захват  $\mu^-$  ядрами вещества является процессом,  $K$ -рый совместно с  $\mu$ -распадом определяет время жизни отрицательно заряженных  $M$ . в веществе. Попадая в конденсиров. вещество,  $\mu^-$  за времена порядка  $10^{-12}$  с тормозится до скоростей атомных электронов и захватывается ядрами на возбужденные орбиты  $\mu$ -мезоатомов (см. *Мюонный атом*). Далее путем серии каскадных переходов за времена меньше  $10^{-11}$  с переходит на  $K$ -орбиту мезоатома. (В процессе этих переходов происходит за счёт спин-орбитального взаимодействия деполаризация первоначально поляризованных  $\mu^-$ , так что на  $K$ -орбите мезоатома поляризация  $\mu^-$  не превышает 15—20%.) Ядерный захват  $\mu^-$  происходит с  $K$ -орбиты мезоатома благодаря слабому взаимодействию, приводящему к реакции



на одном из протонов ядра. При этом процесс захвата  $\mu^-$  ядром может существенно отличаться от  $\mu$ -захвата свободным протоном (6) и требует рассмотрения коллективных возбуждений образующегося ядра. Реакция (6) соответствует элементарное слабое взаимодействие зарядж. токов: лептонного ( $\nu_{\mu}$ ) и кваркового ( $ud$ ), приводящее к превращению кварков внутри нуклонов:



Вероятность  $\mu$ -захвата лёгкими ядрами пропорциональна  $Z^4$  и при  $Z \approx 6$  сравнивается с вероятностью  $\mu$ -распада. Такая закономерность обусловлена тем, что вероятность  $\mu$ -захвата пропорциональна числу протонов в ядре ( $Z$ ) и значению квадрата модуля волновой функции  $M$ , находящегося на  $K$ -орбите, в точке нахождения ядра:  $|\Psi(0)| = Z^3/\pi a_0^3$  (где  $a_0 = \hbar^2/m\mu c^2 = 2,5 \cdot 10^{-11}$  см — боровский радиус для  $M$ ). Указанное расстояние предполагает, что радиус  $K$ -орбиты мезоатома больше размеров ядра. Оно не применимо для  $Z \geq 30$ , когда радиус  $K$ -орбиты  $a_{\mu Z}$  становится сравнимым с радиусом ядра. Для этих значений  $Z$  вероятность  $\mu$ -захвата слабо зависит от  $Z$ . Время жизни  $\mu^-$  в соответствующих веществах определяется в осн. вероятностью  $\mu$ -захвата и составляет  $\sim 10^{-7}$  с.

$M$ , на  $K$ -орбите мезоатома, ядро  $K$ -рого обладает отличной от нуля спином, может находиться в разл. состояниях сверхтонкой структуры, отвечающих разл. ориентации спина  $M$  и ядра. Благодаря синевой зависимости универсального слабого  $(V - A)$  взаимодействия вероятность  $\mu$ -захвата из разных состояний сверхтонкой структуры может сильно различаться. Так, для мезоатома водорода др. вероятность захвата из нижнего, синглетного состояния сверхтонкой структуры (отвечающего полному спину  $F = 0$ ) составляет  $\Lambda_0(p) \approx 660$  с<sup>-1</sup>, в то время как вероятность захвата из триплетного состояния ( $F = 1$ )  $\Lambda_1(p) \approx 12$  с<sup>-1</sup>. Измеряя экспериментально вероятности  $\mu$ -захвата из разл. состояний сверхтонкой структуры, можно по-

лучить ценные сведения о *форм-факторах* слабого взаимодействия. В частности,  $\mu$ -захват предоставляет уникальную возможность измерения константы т. н. индукторов. псевдоскалара ( $g_P$ ), величина  $K$ -рой предсказывается теорией частично сохраняющегося аксиального тока (см. *Аксиальный ток частично сохраняется*). Полученные данные хорошо согласуются с теоретич. предсказаниями. Наиб. важные сведения (с точки зрения возможности их теоретич. интерпретации) получаются из экспериментов по  $\mu$ -захвату простейшими ядрами: протоном, дейтроном, He<sup>3</sup>. Вместе с тем эксперим. изучение процесса  $\mu$ -захвата сложных ядрами даёт, напр., возможность высветить важный вопрос о перенормировке константы  $g_P$  в ядерной материи. Следует отметить, что захвату  $M$ . в водороде и дейтерии предшествует стадия разнообразных мезомолекулярных процессов (переход в ниж. состояние сверхтонкой структуры, образование мезомолекулы), увеличивающих в неск. раз вероятность  $\mu$ -захвата в этих веществах.

Элементарное слабое взаимодействие зарядж. токов ( $\nu_{\mu}$ ) и ( $ud$ ), ведущее к  $\mu$ -захвату, подробно изучено в нейтринных реакциях на водороде, дейтерии и сложных ядрах. Эти реакции сводится к элементарным процессам  $\nu_{\mu} + d \rightarrow u + \mu^+$ ,  $\bar{\nu}_{\mu} + u \rightarrow d + \mu^+$ ,  $\nu_{\mu} + d \rightarrow u + \mu^+$  и используются для определения *структурных функций* кварков и антикварков.

Слабое взаимодействие мюонов с  $T$ -лептоном и тяжёлыми кварками. Помимо слабого взаимодействия зарядж. тока ( $\nu_{\mu}$ ) с токами ( $e\nu_e$ ) и ( $ud$ ) экспериментально изучены также процессы, вызываемые взаимодействием тока ( $\nu_{\mu}$ ) с кварковыми токами ( $us$ ), ( $cs$ ), ( $cd$ ) и ( $cb$ ) [подлептоны (в ряде случаев — чисто лептонные) распадаются странных очарованных и красных (прелестных) частиц, нейтринные реакции с испусканием  $M$ . и рождением странных и очарованных частиц]. Взаимодействие тока ( $\nu_{\mu}$ ) и ( $\nu_{\tau}$ ) проявляется в распадах  $T$ -лептона  $\tau^- \rightarrow \nu_{\mu} \bar{\nu}_{\mu} \nu_e$ ,  $\tau^+ \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} \nu_{\mu} \nu_e$  и согласуется с теорией электрослабого взаимодействия.

**Проникающая способность мюонов**

$M$ . высокой энергии тормозится в веществе за счёт эл.-магн. взаимодействия с электронами и ядрами вещества. До энергий  $10^{11} - 10^{12}$  эВ  $M$ . теряет энергию и осн. на ионизацию атомов среды [прибл.  $2\text{МэВ}/(\text{г}\cdot\text{см}^2)$  вещества, напр.  $\sim 4,5$  ГэВ на  $1$  м пути, проходимого в железе]. Ср. пробег  $M$ . в этой области растёт пропорционально их энергии, а их угол. отклонение определяется многократным кулоновскими рассеянием на ядрах вещества. Т. к.  $m_{\mu} \gg m_e$ , вероятность потери энергии  $M$ . в результате тормозного излучения или рождения пар  $e^+e^-$  значительно меньше, чем для электронов (указанные процессы, а также расщепление атомных ядер начинают играть доминирующую роль при энергиях  $M$ . выше  $10^{12}$  эВ, ограничивая дальнейший линейный рост длины пробега  $M$ . в веществе с увеличением энергии). Эти факторы вместе с отсутствием у  $M$ . сильного взаимодействия обуславливают высокую проникающую способность  $M$ . как по сравнению с адронами, так и по сравнению с электронами и  $\gamma$ -квантами. В результате  $M$ . космич. лучей не только легко проникают через атмосферу Земли, но и углубляются в грунт на значит. расстояния (в зависимости от их энергии). В подземных экспериментах  $M$ . космических лучей с энергией больше  $10^{12}$  эВ регистрируются на глубине неск. км.

Большая проникающая способность при высоких энергиях позволяет легко выделять  $M$ . экспериментально среди др. зарядж. частиц по их способности проходить через толстые (в неск. м) фильтры (напр., из железа). Таким способом изучались каналы распадов  $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и др.

Лит.: Мюон физикс, ed. by Ч. В. Диббелс, С. S. Wu, в. 1—3, N. Y.—[а. о.], 1975; Вайсберг А. О., Мю-мезон, М., 1964; Балашов В. В., Корелман Г. Я., Эрем-

ж и я Р. А., Поглощение мезонов атомными ядрами, М., 1978; Оку и я Л. В., Лептон и кварки, М., 1981. С. С. Герштейн. **МЯГКИЕ ПРОЦЕССЫ** — реакции с участием адронов с малым поперечным импульсом ( $\lesssim 1$  ГэВ/c) всех регистрируемых частиц. При высоких энергиях сталкивающихся частиц это соответствует сечению, вкладу в сечение области больших прицельных параметров (порядка размера адронов). К М. п. можно отнести процессы упругого рассеяния, дифракционной диссоциации, перезарядки, множественные процессы и др., дающие осн. вклад в полное сечение взаимодействия частиц.

Наиб. известная феноменологич. схема описания М. п. — *Редже полосу метод* [1], где поведение амплитуды бинарного процесса  $a + b \rightarrow c + d$  определяется особенностями в комплексной плоскости орбитального момента парциальной амплитуды перекрестного канала (см. *Перекрестная симметрия*). При этом особенность Померанчука (померон), имеющая квантовые числа вакуума, определяет асимптотику полного сечения взаимодействия, к-рое слабо зависит от нач. энергии  $\sqrt{s}$  [допустимая Фрауссера ограничением скорость роста полного сечения  $\sigma_{tot} < (\ln s)^2$ ].

Особенности с квантовыми числами мезонов  $I, \omega, \rho, A_2$  определяют энергетич. зависимость сечений реакций перезарядки  $\sigma_{ex} \sim 1/\sqrt{s}$ . Важным предсказанием метода, подтвержденным экспериментально, является сужение с ростом энергии конуса рассеяния, т. е. сущест. области переданных импульсов.

Значит, успехи в качеств. описании характерных свойств М. п. были достигнуты в аддитивной модели кварков, в к-рой предполагается, что каждый адрон состоит из валентных (конституентных) кварков, независимо рассеивающихся друг на друга. Одно из наиб. ярких следствий этой гипотезы — соотношение Левина — Франкфурта [2], согласно к-рому отношение полных сечений взаимодействия протона и пиона с протоном равно отношению числа валентных кварков этих частиц, т. е.  $3/2$ . Подтверждены экспериментом и др. предсказания модели, напр. соотношение между сечениями взаимодействия К-мезонов и гиперонов, в состав к-рых входит страннй кварк.

В *квантовой хромодинамике* (КХД) изучение М. п. наталкивается на перешенную проблему *убеждения цвета*. Большая величина константы связи не позволяет описывать М. п. методами теории возмущений. Тем не менее идеи и повятия КХД широко используются при построении феноменологич. моделей. Так, в модели дуальных струн (см. *Струнные модели адронов*) вклад *реджеона* в амплитуду упругого рассеяния или бинарный перезарядки описывается плоским кварковым графиком (рис. 1, а). Соответствующие реджеону множеств. процессы, согласно *унитарности условию*, являются результатом замедления и аннигиляции пары валентных кварка-антикварка сталкивающихся адронов и образования в конечном состоянии цветной струны с

(рис. 2, а) соответствует образованию двух струн в конечном состоянии, фрагментирующихся независимо (рис. 2, б). Этому отвечает кварковый график цилиндрич. топологии (рис. 2, в). В таком подходе удеётся

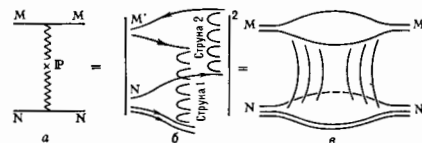


Рис. 2. Графики, описывающие вклад реджеона: а — обмен помероном  $P$ ; б — соответствующее сечение процесса множественного рождения, отвечающее разрыву двух струн; в — соответствующая кварковая диаграмма, имеющая топологию поверхности цилиндра.

связать между собой многие параметры теории Редже, к-рые ранее считались независимыми, напр. пересечения траекторий Редже с разными квантовыми числами. Адронизация струн описывается или с помощью феноменологич. функций фрагментации (см. *Партоны*), или путём моделирования методом Монте-Карло образования адронов в модели цветной струны [3].

В настоящее время происходит интенсивное развитие моделей, описывающих М. п. в рамках представлений КХД, однако полное их понимание может быть достигнуто лишь после решения проблемы удержания цвета.

Лит.: 1) Коллинз П., Введение в релятивистскую теорию и физику высоких энергий, пер. с англ., М., 1980; 2) Левин в и Е. М., Франкфурт Л. Л., Гипотеза кварков и соотношения между сечениями при высокой энергии, «Письма в ЖЭТФ», 1965, т. 2, с. 105-33; Искупругие взаимодействия при высоких энергиях и хромодинамика, Тб., 1986.

В. Э. Копельсон.  
**МЯГКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ** — режим возбуждения колебаний, при к-ром автоколебания возникают самопроизвольно, без нач. толчка, за счёт имеющихся флуктуаций в колебат. системе.



**НАБЛЮДАЕМАЯ** (измеряемая, или физическая, величина) в *квантовой механике* — физ. величина, удовлетворяющая след. требованиям: 1) для физ. систем существуют состояния, в каждом из к-рых рассматриваемая величина с достоверностью имеет вполне определенное характерное для этого состояния значение (наз. собственным значением данной величины); 2) в результате измерения рассматриваемой величины в любом произвольном состоянии физ. системы получается одно из её собств. значений. Состояние, в к-ром физ. величина принимает то или иное собств. значение, наз. её собственным состоянием и имеет, отвечающий (или принадлежащий) данному собств. значению. Одному и тому же собств. значению может принадлежать неск. собств. состояний рассматриваемой физ. величины, отличающихся значениями, к-рые принимают в них к.-л. др. величины. В этом случае собств. значение величины наз. вырожденным. (Так, собств. значение квадрата угла момента принадлежит неск. собств. состояний, отличающихся значениями проекции момента на произвольную ось в пространстве.) Требование 1 представляет собой условие повторяемости измерения физ. величины по крайней мере для не-

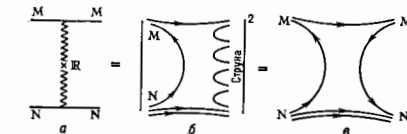


Рис. 1. Графики, описывающие вклад реджеона (R) в мнимую часть амплитуды упругого мезон-нуклонного (M — N) рассеяния: а — обмен реджеоном; б — соответствующее сечение (вклад модуля амплитуды) процесса множественного рождения адронов, отвечающее разрыву одной струны; в — соответствующая плоская топологическая кварковая диаграмма.

бстрыми кварком и антикварком (или дикварком) на концах (рис. 2, б), к-рая благодаря рождению кварк-антикварковых пар из вакуума распадается на бесцветные адроны (в осн. л-мезоны). Вкладу померона

к-рых определ. состояний физ. системы. Действительно, если физ. система находится в состоянии, представляющем к.-л. состоянием физ. величины, то любые повторные измерения этой величины будут всегда давать определ. результат — её собствен. значение в данном состоянии. Отсутствие же собствен. состояний означало бы, что у физ. систем нет состояний в к-рых повторные измерения величины давали бы тот же результат, и поэтому эту величину нельзя рассматривать в качестве измеримой, т. е. наблюдаемой, или физической.

Из принципа суперпозиции состояний (см. Суперпозиции принцип) и требования 2, предъявляемого физ. величине, следует, что любое физ. состояние системы может быть представлено в виде суперпозиции собствен. состояний физ. величины, т. е. собствен. состояния образуют полную систему векторов состояния. Аналогичными свойствами обладают собствен. векторы линейного эрмитового оператора, собствен. значения к-рого являются действит. числами. Поэтому в качестве одного из постулатов квантовой механики принимается то, что каждой физ. величине соответствует линейный оператор, собствен. значения к-рого равны собствен. значениям физ. величины, а собствен. векторы являются собствен. состояниями физ. величины, принадлежащими данному собствен. значению.

Две физ. величины являются одновременно измеримыми, если существуют состояния, в к-рых обе эти величины с достоверностью принимают одновременно свои собствен. значения (т. е. собствен. состояния одной из них являются одновременно собствен. состояниями другой). Необходимым и достаточным условием этого является условие коммутативности операторов, отвечающих этим величинам. Если две величины  $A$  и  $B$  не измеримы одновременно, то теряет прямой смысл понятие произведения этих величин, т. к. оператор произведения двух некомутирующих эрмитовых операторов  $A$  и  $B$  физ. величин не будет эрмитовым (т. е. не может отвечать к.-л. физ. величине)  $(AB)^{\dagger} = BA \neq AB$ . Однако в этом случае можно определить т. н. симметризов. произведение двух величин как величину, к-рой соответствует эрмитов оператор  $\frac{1}{2}(AB + BA)$ . Состояние физ. системы может быть определено путём задания нек-рой совокупности физ. величин, характеризующих систему (т. н. полного набора измеримых величин). Очевидно, что физ. величины, входящие в полный набор, должны быть измеримы одновременно, т. е. их операторы должны коммутировать.

Лит. см. при ст. Квантовая механика. С. С. Герштейн.

**НАБЛЮДАЕМЫЕ АЛГЕБРА** — множество наблюдаемых физ. систем, наделённое структурой алгебры над полем комплексных чисел. Наблюдаемой наз. любую физ. величину, значения к-рой можно найти экспериментально. Т. к. всякий эксперимент осуществляется в ограниченной области пространства и в течение конечного промежутка времени, то каждая наблюдаемая локализована в нек-рой ограниченной области  $O$  пространства-времени  $M$ , т. е. её значения можно измерить посредством экспериментов в  $O$ . Две наблюдаемые одной системы наз. совместными (несовместными) между собой, если они допустимы (не допускают) одновременное и независимое измерение. В классич. системах все наблюдаемые совместны. Для релятивистских квантовых систем, в силу причинности принципа, любые две наблюдаемые совместны, если они относятся к областям из  $M$ , разделённым пространственноподобным интервалом. Наблюдаемая, локализованная в ограниченной области  $M$  и подчинённая принципу причинности, наз. локальной и наблюдаемой. Т. о., для релятивистских квантовых систем все наблюдаемые локальны; однако на практике удобно причислять к наблюдаемым также глобальные, суммарные характеристики системы, типа полного заряда, полной энергии-импульса, и т. п., получаемые из локальных

наблюдаемых при помощи к.-л. предельных операций. В этом смысле говорят о квазилокальных и глобальных наблюдаемых.

Наблюдаемые можно представлять с помощью разл. матем. объектов. Для квантовой теории, где состояния системы обычно представляются векторами гильбертова пространства  $\mathcal{H}$ , стандартным является представление наблюдаемых операторами в гильбертовом пространстве, причём операторы, отвечающие совместным наблюдаемым, коммутируют между собой. Операторы должны быть эрмитовыми, ибо измеримые значения наблюдаемых вещественны, операторы могут быть ограниченными и неограниченными (в частности, наблюдаемым координат и импульсов, удовлетворяющим канонич. перестановочным соотношениям, всегда отвечают неограниченные операторы). Однако, т. к. операторы наблюдаемых эрмитовы, неограниченными операторами можно сопоставить ограниченные спектральные проекции неограниченных. В этом случае множество всех наблюдаемых квантовой системы отвечает множеству  $A$  эрмитовых (ограниченных) операторов в  $\mathcal{H}$ . Добавляя к  $A$  все произведения его элементов, получаем алгебру  $R$ , к-рая наз. Н. а. квантовой системы (хотя не все её операторы отвечают наблюдаемым). Иногда вместо указанного добавления вводят новую операцию перемножения операторов:  $B \cdot A = (AB + BA)/2$ ; по отношению к этой операции  $A$  — коммутативная алгебра, принадлежащая классу т. н. йордановых алгебр. В квантовой механике алгебра  $R$  обычно совпадает с алгеброй  $B(\mathcal{H})$  всех ограниченных операторов в  $\mathcal{H}$ .

Ясно, что с помощью Н. а. можно описывать любые физ. системы, классические и квантовые, релятивистские и нерелятивистские. Наиб. плодотворным такой способ описания оказывается в квантовой теории, где успешно развивается алгебраич. подход в квантовой статистич. механике и алгебраический подход в квантовой теории поля. В последнем случае, чтобы учесть принцип причинности, нужно рассматривать множества наблюдаемых для каждой ограниченной (ибо наблюдаемые локализованы в ограниченных областях) области  $O$  из  $M$ . Описание релятивистской квантовой системы с помощью таких множеств существует в двух вариантах: конкретный подход, где  $A(O)$  — множество эрмитовых элементов алгебры фон Неймана  $R(O)$ ; абстрактный подход, где  $A(O)$  — множество эрмитовых элементов абстрактной  $C^*$ -алгебры  $\mathfrak{U}(O)$ . Алгебры  $R(O)$  и  $\mathfrak{U}(O)$  наз. алгебрами локальных наблюдаемых (локальными алгебрами) области  $O$ ; их совокупности для всех ограниченных областей  $O$  подчиняется системе аксиом (см. Аксиоматическая квантовая теория поля). Объединению локальных алгебр по всем  $O$  можно придать структуру  $C^*$ -алгебры; эта алгебра наз. квантовой локальной алгеброй, а её элементы — квазилокальными наблюдаемыми. Объединению алгебр  $R(O)$  по всем  $O$  можно придать также структуру алгебры фон Неймана; эта алгебра включает в себя квазилокальную и наз. глобальной алгеброй, а её элементы — глобальными наблюдаемыми. Состояния системы при этом обычно рассматривают как нормированные положит. функционалы на квазилокальной алгебре; представляемые состояния вектором в гильбертовом пространстве является частным случаем такой трактовки. Аналогично строится и алгебраич. подход в квантовой статистич. механике. Место множеств  $A(O)$  здесь занимают множества  $A(V)$  наблюдаемых, отвечающих конечным областям пространства или, в решётчатых системах, конечным подмножествам ячеек решётки. Аналогом фундам. принципа локальности (причинности) в релятивистской теории здесь служит требование взаимной совместности любых наблюдаемых, отвечающих непересекающимся областям.

Описание квантовополевой системы с помощью локальных алгебр первоначально использовалось для



построения асимптотич. теории. Затем оно стало применяться и для изучения конкретных моделей. Алгебраич. аппарат открывает здесь большие возможности: выбирая разл. состояния на квазилокальной алгебре, можно канонически строить описания системы, обладающие разл. желательными свойствами — наличием, отсутствием или вырождением вакуума, сохранением или нарушением тех или иных симметрий и т. п. В статистич. механике алгебраич. методы оказываются эффективными для описания и изучения равновесных состояний. С их помощью, напр., установлена эквивалентность разл. определенных равновесного состояния, доказаны соотношения Онсагера для модели стационарной неравновесной термодинамики.

Лит.: Рю в л ь Д., Статистическая механика. Строгие результаты, пер. с англ., М., 1974; Э м х Ж., Алгебраические методы в статистической механике и квантовой теории поля, пер. с англ., М., 1976; Ф и д д е в и Д. Л., И к у б о в с к и й О. А., Лекции по квантовой механике, Л., 1966; Х о р ж и й С. С., Введение в алгебраическую квантовую теорию поля, М., 1986. С. С. Хоружий

**НАБЛЮДЕНИИ ОБРАБОТКА** — см. *Анализ данных*.  
**НАВЬЕ — СТОКСА УРАВНЕНИЯ** — дифференц. ур-ния движения вязкой жидкости (газа). В простейшем случае движения несжимаемой (плотность  $\rho = \text{const}$ ) и неагрегаемой (температура  $T = \text{const}$ ) жидкости Н.—С. у. имеют вид:

a) в векторной форме

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \nabla^2 \mathbf{v}; \quad (1)$$

b) в проекциях на прямоуг. декартовы оси координат (система трёх ур-ний)

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 v_x. \quad (2)$$

Здесь  $t$  — время;  $x, y, z$  — координаты частицы жидкости;  $v$  — её скорость ( $v_x, v_y, v_z$  — проекции  $v$ );  $\mathbf{F}$  — объёмная сила ( $X, Y, Z$  — проекция  $\mathbf{F}$ );  $p$  — давление;  $\nu = \mu/\rho$  — кинематич. коэф. вязкости ( $\mu$  — динамич. коэф. вязкости) и

$$\nabla^2 v_x = \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}.$$

Н.—С. у. (2) служат для определения  $v_x, v_y, v_z$  как ф-ций  $x, y, z, t$ . Чтобы замкнуть систему, к ур-ниям (2) присоединяют ур-ние неразрывности, имеющее для несжимаемой жидкости вид

$$\theta = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Для интегрирования ур-ний (2), (3) требуется задать начальные (если движение не является стационарным) и граничные условия. Граничным условием для скоростей в вязкой жидкости является условие прилипания к твёрдым стенкам: на неподвижной стенке  $v = 0$ , а на движущейся стенке  $v$  равно скорости соответствующей точки стенки.

В общем случае движения сжимаемой вязкой жидкости (газа) Н.—С. у. в проекциях на прямоуг. декартовы оси координат имеют вид

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \\ = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial \mu}{\partial x} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial y} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial \mu}{\partial z} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial x} \theta \left( -\frac{2}{3} \mu + \mu' \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mu'$  — т. н. второй коэф. вязкости (см. *Вязкость и Объёмная вязкость*). Обычно при решении задач гидродинамики объёмную вязкость не учитывают, полагая  $\mu' = 0$ .

Коэф.  $\mu$  зависит вообще от температуры  $T$ , где  $T = T(x, y, z, t)$ ; при этом зависимость  $\mu(T)$  считается известной. Т. о., ур-ния (4) содержат 6 неизвестных ф-ций от координат и времени:  $v_x, v_y, v_z, p, \rho, T$ . Чтобы

замкнуть систему, к ур-ниям (4) присоединяют *неразрывности уравнение*, ур-ние баланса энергии и *Клапейрона уравнение*.

Если зависимость  $\mu(T)$  можно пренебречь, полагая  $\mu = \text{const}$ , то Н.—С. у. для сжимаемой жидкости принимает более простой вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \\ = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \nu \nabla^2 v_x. \end{aligned} \quad (5)$$

В этом случае к ур-ням (5) присоединяют ур-ние неразрывности и ур-ние состояния в виде  $p = p(\rho)$ .

Н.—С. у. применяют при изучении движений реальных жидкостей и газов. Однако в силу нелинейности этих ур-ний точные решения удаётся найти лишь для небольшого ряда частных случаев; в большинстве конкретных задач ограничиваются отысканием тех или иных приближённых решений (см. *Гидродинамика*). Применяются также численные методы интегрирования этих ур-ний с использованием ЭВМ.

Лит.: Ко ч и н Н. Е., К и б е л ь И. А., Р о з е Н. В., Теоретическая гидромеханика, ч. 1, 6 изд., ч. 2, 4 изд., М., 1963; Л а н д а у Л. Д., Л и ф ш и ц Е. М., Гидродинамика, 4 изд., М., 1988; Д о в г я н с к и й Л. Г., Механика жидкости и газа, 6 изд., М., 1987. (В первых двух источниках Н.—С. у. приведены в цилиндрич. и сферич. координатах.) См. также лит. при ст. *Гидроаэромеханика*. С. М. Тарс

**НАГРЕВ ПЛАЗМЫ** — процесс передачи энергии внеш. источников на энергию хаотич. движения частиц плазмы; важен для осуществления *управляемого термоядерного синтеза*.

Существует неск. методов Н. п. В установках с магн. удержанием плазмы (токамаках, открытых ловушках, стеллараторах и др.) основными являются: омический (джоулев) нагрев; нагрев с помощью ВЧ эл. магн. поля; нагрев пучками атомов. В импульсных установках с магн. удержанием плазмы применяют также нагрев с помощью быстронарастающего магн. поля, инжекции в плазму электронных и ионных пучков и лазерного излучения.

Омический нагрев наиб. прост по физ. принципам и по техн. реализации; он применяется гл. обр. в замкнутых ловушках — *токамаках* и *стеллараторах*. Мощность омич. Н. п. определяется ф-лой  $P = I^2 R$ , где  $I$  — тороидальный ток,  $R$  — сопротивление плазменного витка. Т. к. ток  $I$  ограничен сверху условиями устойчивости плазмы, мощность омич. нагрева велика только при высоком сопротивлении плазмы. Для полностью ионизов. плазмы  $R \propto T^{-1/2}$ , где  $T$  — температура плазмы, поэтому мощность омич. нагрева быстро падает с ростом температуры и при термоядерных темп-рах ( $T \sim 10^8$  К) используют др. методы нагрева.

Высокочастотные методы Н. п. чаще всего основаны на использовании разл. резонансных эффектов.

И о н о - ц и к л о т р о н н ы й р е з о н а н с н ы й н а г р е в (ИЦНР) определяется условием равенства частоты  $\omega$  влещ. поля первой или второй гармонике лонной циклотронной частоты  $\omega = \omega_{B1} = ZeB/mc$  ( $Ze$  — заряд иона,  $B$  — индукция удерживающего магн. поля,  $m$  — масса иона). Обычно ИЦНР в крупных токамаках требует применения эл. магн. колебаний с длиной волны  $\sim 10$  м. Иногда применяется ИЦНР на ионах малой примеси (напр., на ионах  $\text{Ne}^3$  в дейтериевой плазме). Можно создать также условия, когда при ИЦНР энергия будет вкладываться в осн. в электроны. На крупных совр. токамаках мощность ИЦНР достигает 18 МВт. Достоинствами ИЦНР являются относит. простота и доступность мощных генераторов декаметрового диапазона, относит. недостаток — трудность ввода ДВ-колебаний в плазму, что требует установки непосредственно в вакуумной камере токамака сложных антенных структур, подвергающихся воздействию разл. видов излучения плазмы. ИЦНР (как и др. виды ВЧ-нагрева) успешно применяется также в открытых ловушках и стеллараторах.

Нижнегибридный нагрев (НГН) основан на наличии резонанса для быстрых магнитоэвронных волн (см. *Волны в плазме*) вблизи т. н. нижнегибридной частоты, к-рая для плазмы с одним сортом ионов равна  $(\omega_{\text{вн}} \omega_{\text{вн}})^{1/2}$ , где  $\omega_{\text{вн}} = eB/mc$  — электронная циклотронная частота. В крупных токамаках нижнегибридной частоте соответствует длина волны  $\sim 10-20$  см. Мощность НГН в совр. экспериментах достигает 10 МВт. Воздействие на плазму ВЧ-полем в диапазоне нижнегибридной частоты используется также для возбуждения и поддержания тороидального тока в замкнутых установках.

Электронно-циклотронный резонансный нагрев (ЭЦН) основан на близости частот эл.-магн. волны  $\omega$  к электронной циклотронной частоте  $\omega_{\text{вн}}$  (или ее гармонике). Для реактора-токамака это соответствует эл.-магн. волнам длиной 1-2 мм, генератором к-рых обычно бывают *гиротроны*. Гиротронный комплекс токамака Т-10 (СССР) обеспечивает ввод в плазму излучения мощностью 4 МВт. Применение мощного ЭЦН в открытых ловушках позволяет создавать в них «надтепловые» электроны, что необходимо для формирования в них тепловых барьеров (см. *Открытые ловушки*). ЭЦН и др. резонансные методы нагрева позволяют в определ. мере уравнивать распределение мощности нагрева по сечению плазмы.

**Пучковый нагрев.** Широко используется для Н. п. пучки атомов водорода (и его изотопов) с энергией от десятков кэВ до неск. МэВ. Применяются именно атомарные, а не ионные пучки, т. к. они легко проникают в сильное магн. поле. Попадая в плазму, быстрые атомы превращаются в ионы (следствие ионизации и перезарядки) и, т. к. их ларморовский радиус мал по сравнению с поперечным размером плазмы, остаются в ней и постепенно передают свою энергию частицам плазмы в результате кулоновских столкновений. Энергию пучка подбирают из условия, чтобы глубина проникновения быстрых атомов в плазму, определяемая процессами ионизации и перезарядки, была сравнима с характерным размером плазмы. Для получения атомарных пучков сначала в газоразрядном *ионном источнике* создают медленные ионы водорода (или его изотопов), затем их ускоряют до нужной энергии и, наконец, пропускают через перезарядную мишень (обычно облако газообразного водорода), где быстрый ион нейтрализуется в реакции перезарядки.

В нов. 1980-х гг. получены пучки дейтронов с энергией  $\geq 100$  кэВ, эквивалентным током 50 А и длительностью импульса в неск. секунд. Используя неск. пучков, мощность инжекции на крупных токамаках доводил до 30 МВт.

При энергиях дейтронов, значительно превышающих 100 кэВ, перезарядка положит. ионов становится неэффективной. Для получения атомарных пучков с большей энергией используется отрицат. ионы водорода: они также извлекаются из спец. ионного источника, ускоряются, а затем «обдираются» до нейтральных атомов в газовой мишени. Таким способом получают пучки атомов с энергией в сотни кэВ и пламяруют пучок пучки с энергией св. 1 МэВ. Достоинством метода Н. п. атомарными пучками является хорошая контролируемость процесса нагрева, недостатком — высокая стоимость соответствующих систем нагрева (особенно при больших энергиях инжекции).

Среди др. методов Н. п. в токамаках используют также адиабатич. сжатие плазменного шнура (обычно оно осуществляется как по большому, так и по малому радиусу) и нагрев НЧ-колебаниями  $\omega \ll \omega_{\text{вн}}$ .

Наиб. известный метод Н. п. в импульсных системах с магн. удержанием — *тета-пинч*, т. е. быстрое сжатие плазмы по радиусу нарастающим продольным магн. полем (см. *Пинч-эффект*). Таким способом на одной из экперим. установок в Лос-Аламосской лаборатории (США) была получена плазма плотностью  $10^{14}$  см $^{-3}$  и темп-рой  $10^7$  К. Др. метод — столкновение плазменных

сгустков, «выстреливаемых» навстречу друг другу с двух концов установки. Большая группа методов Н. п. связана с инжекцией пучков электронов или ионов с конца установки вдоль магн. поля. Т. д. длина свободного пробега частиц пучка по отношению к кулоновским столкновениям с электронами и ионами плазмы обычно заметно превышает длину установки, нагрев осуществляется в результате возбуждения пучком надтепловых микрофлукуэтивных плазм, к-рые затем передают свою энергию в тепло (группу методов нагрева, связанных с возбуждением плазменной микротурбулентности, иногда объединяют термином «турбулентный нагрев»).

В термоядерных системах с *инерциальным удержанием* плазмы Н. п. осуществляется в результате ее быстрого сжатия склонаивающейся тяжелой оболочкой. Для разгона оболочка прижимается либо реактивной силой, возникающая при абляции (испарении) ее внеш. слоя под действием мощного потока светового излучения (в сферич. геометрии), либо сила давления магн. поля, создаваемого протекающим по оболочке импульсным током (схемы миниаторного Z-пинча).

Лит.: В а б м я и м. В., *Электронный термоядерный синтез*, в кн.: *Источники энергии*, сер. Физика плазмы, т. 1, ч. 2, М., 1981; В а с о в П. Г. и др., *Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером*, в кн.: *Источники энергии и техники*, сер. Радиотехника, т. 26, ч. 1, М., 1982; Р а б о в я м ч. Д., Д л е ш и в и в Н. В., С о м а ш и н П. Н., *Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей*, М., 1986; Г о л о в В. Е., Ф и л о р о в В. И., *Высоочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках*, М., 1986. Д. Д. Ротом.

**НАДВАРЬЕРНОЕ ОТРАЖЕНИЕ** — квантовомеханич. эффект отражения частицы от *потенциального барьера* в случае, когда ее энергия больше высоты барьера. См. *Квазиклассическое приближение*.

**НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРИНЦИП** — один из вариационных принципов механики, согласно к-рому для данного класса сравниваемых друг с другом движений механич. системы действительным является то, для к-рого физ. величина, наз. *действием*, имеет минимум (точнее, экстремум). Обычно Н. д. п. применяется в одной из двух форм.

а) Н. д. п. в форме Гамильтона — Остроградского. В этом случае под действием за промежуток времени  $t_1 - t_0$  понимают величину

$$S = \int_{t_0}^{t_1} L dt,$$

где  $L$  — функция Лагранжа, зависящая от обобщенных координат системы  $q_i$ , обобщенных скоростей  $\dot{q}_i$  и времени  $t$  (см. *Лагранжа функция*). Н. д. п. в этой форме устанавливает, что среди всех кинематически возможных перемещений системы из одной конфигурации в другую (близкую к первой), совершаемых за один и тот же промежуток времени  $t_1 - t_0$ , действительным является то, для к-рого действие  $S$  будет наименьшим. Матем. выражение Н. д. п. имеет в этом случае вид

$$\delta S = 0, \quad (1)$$

где  $\delta$  — символ *всполой* (изохронной) вариации. б) Н. д. п. в форме Мопертюи — Лагранжа. В этом случае под действием за промежуток времени  $t_1 - t_0$ , в течение к-рого система перемещается из конфигурации  $A$  в конфигурацию  $B$ , понимают величину

$$S_0 = \int_{t_0}^{t_1} 2T dt \quad \text{или} \quad S_0 = \int_A^B \sum_i p_i dq_i,$$

где  $T$  — кинетич. энергия системы,  $p_i$  — обобщенные импульсы. Н. д. п. в этой форме устанавливает, что среди всех кинематически возможных перемещений системы из конфигурации  $A$  в близкую к ней конфигурацию  $B$ , совершаемых при сохранении одной и той же величины полной энергии системы, действительным является то, для к-рого действие  $S_0$  будет наименьшим.

Матем. выражение Н. д. п. в этом случае имеет вид

$$\Delta S_0 = 0, \quad (2)$$

где  $\Delta$  — символ полной вариации (в отличие от принципа Гамильтона — Остроградского, здесь варьируются не только координаты и скорости, но и время перемещения системы из одной конфигурации в другую).

Н. д. п. в форме (2) справедлив только для консервативных и притом *голоморфных систем*. Н. д. п. в форме (1) является более общим и, в частности, может быть распространён на неконсервативные системы. Н. д. п. используются для составления ур-ний движения механич. систем и для исследования общих свойств этих движений. При соответствующем обобщении понятий Н. д. п. находит приложения в механике непрерывной среды, в электродинамике, квантовой механике и др.

Литт. см. при статьях *Вариационные принципы механики, Действие и Динамика*. С. М. Тарг.

**НАИМЕНЬШЕГО ПРИНУЖДЕНИЯ ПРИНЦИП** — см. *Герца принцип*.

**НАИМЕНЬШЕЙ КРИВИЗНЫ ПРИНЦИП** — см. *Герца принцип*.

**НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ МЕТОД** — метод оценивания неизвестных параметров теоретич. моделей по косвенным измерениям при параметрич. анализе данных (см. *Анализ данных*). Н. к. м. был предложен К. Гауссом (С. Gauß, 1809) для задач геодезии и астрономии в след. формулировке. Пусть существует модель явления, в  $k$ -ой  $x$  — вектор аргументов,  $a$  — вектор неизвестных параметров. Для определения параметров  $a$  проводятся косвенные измерения, т. е. измеряются не сами параметры  $a$ , а ф-ции этих параметров  $f(x|a)$ , вычисляемые согласно модели. Благодаря ошибкам измерения  $\varepsilon_n$  результаты измерения  $Y_n$  равны

$$Y_n = f(x_n|a) + \varepsilon_n.$$

Относительно  $\varepsilon_n$  предполагается, что они являются чисто случайными величинами, т. е. при многократном проведении измерений их ср. значения равны нулю,  $M(\varepsilon_n) = 0$ ,  $M(Y_n) = f(x_n|a)$ , а также что они некоррелированы и их дисперсии равны  $\sigma_n^2$ ,  $M(\varepsilon_n \varepsilon_m) = \sigma_n^2 \delta_{nm}$ . Согласно Гауссу, в качестве оценки  $a$  (оценки Н. к. м.) следует взять величину  $\hat{a}$ , минимизирующую выражение

$$\Phi = \sum_{n=1}^N \left( \frac{Y_n - f(x_n|a)}{\sigma_n} \right)^2.$$

При этом подразумевается, что число измерений  $N \geq I$ , где  $I$  — число неизвестных параметров  $a_i$ .

Обобщением метода на случай коррелиров. ошибок измерения,  $M(\varepsilon_n \varepsilon_m) = \Sigma_{nm}$ , является поиск величины  $\hat{a}$  из условия минимума квадратичной формы

$$\Phi = \sum_{n,m} (Y_n - f(x_n|a)) \Sigma_{nm}^{-1} (Y_m - f(x_m|a)). \quad (1)$$

Н. к. м. используют при обработке результатов наблюдений, в раал. задач *регрессионного анализа* и т. д. Напр., в физике элементарных частиц его применяют для оценки импульса частицы по измерениям координат точек её траектории в магн. поле и оценки параметров плотности распределения  $p(x|a)$  случайной величины  $x$  по числу событий  $Y_n$  в ячейках *гистограмм*.

Оптимальность оценки Н. к. м. Использование метода обусловлено оптим. свойствами его оценки для моделей с линейной зависимостью  $M(Y_n) = f(x_n|a)$  от параметров  $a$ . Рассмотрим их. Итак, пусть

$$Y_n = \sum_{i=1}^I A_{ni} a_i + \varepsilon_n. \quad (2)$$

Выражение (1) в этом случае кратко записывается в виде

$$\Phi = (Y - Aa)^T \Sigma^{-1} (Y - Aa),$$

где  $T$  — символ транспонирования. В предположении, что ранг матрицы  $A$  больше или равен  $I$ , оценка Н. к. м. равна

$$\hat{a} = (A^T \Sigma^{-1} A)^{-1} A^T \Sigma^{-1} Y. \quad (3)$$

Из (3) следует, что  $\hat{a}$  является линейной оценкой, т. е. линейной ф-цией измерений  $Y_n$ . Если усреднить (3) по ошибкам измерения, то оказывается, что

$$M(\hat{a}) = a,$$

т. е. оценка является несмещённой.

Благодаря ошибкам измерения  $\hat{a}$  имеет шумовую составляющую,  $k$ -рая характеризуется матрицей ошибок (*ковариационной матрицей*):

$$K = M[(\hat{a} - M(\hat{a}))(\hat{a} - M(\hat{a}))^T] = (A^T \Sigma^{-1} A)^{-1}.$$

Диагональные элементы  $K_{ii}$  являются дисперсиями ошибок, содержащихся в  $\hat{a}_i$ .

В исследование оптимальности Н. к. м. внёс вклад А. А. Марков, к-рый в 1900 доказал след. утверждение (теорема Гаусса — Маркова): среди всех линейных несмещённых оценок минимальными дисперсиями  $K_{ii}$  обладает оценка (3), т. е. оценка Н. к. м.

В том случае, когда  $\Sigma = \sigma^2 \hat{\Sigma}$ , где  $\sigma^2$  — неизвестный параметр,  $\hat{\Sigma}$  — известная матрица, несмещённой оценкой  $\sigma^2$  является величина

$$\hat{\sigma}^2 = \Phi(a = \hat{a}) / (N - I).$$

Величину  $N - I$  наз. числом степеней свободы.

Подчеркнём, что перечисленные оптим. свойства оценки Н. к. м. не зависят от вида распределения вектора  $\varepsilon$ , а лишь от предположения справедливости линейной связи (2).

Иногда оказывается, что между искомыми параметрами  $a_i$  существует связь, отражающая физ. закономерность:

$$g_l(a) = b_l, \quad l = 1, \dots, L. \quad (4)$$

Напр., импульсы всех частиц в точке взаимодействия удовлетворяют закону сохранения 4-импульса. Учёт такой априорной информации приводит к уменьшению ошибок оценок параметров.

Если связи (4) линейны, т. е.

$$\sum_{i=1}^I G_{li} a_i = b_l, \quad l = 1, \dots, L, \quad (5)$$

то оценка  $\hat{a}$  Н. к. м., удовлетворяющая (5), имеет вид

$$\hat{a}_G = [(A^T \Sigma^{-1} A)^{-1} - D] A^T \Sigma^{-1} Y + C^T b, \quad (6)$$

где

$$D = (A^T \Sigma^{-1} A)^{-1} G^T [G(A^T \Sigma^{-1} A)^{-1} G^T]^{-1} G(A^T \Sigma^{-1} A)^{-1},$$

$$C = [G(A^T \Sigma^{-1} A)^{-1} G^T]^{-1} G(A^T \Sigma^{-1} A)^{-1}.$$

Можно убедиться, что оценка (6) является несмещённой, а для её матрицы ошибок  $K_G$  выполняется

$$K_G = K - D < K, \quad K_{G_i} < K_{ii},$$

т. к.  $D$  — положительно определённая матрица.

В случае нелинейных связей (4) задача построения оценки Н. к. м., удовлетворяющей (4), существенно усложняется и решается численными методами.

**Разновидности Н. к. м.** Важным частным случаем Н. к. м. является  $\chi^2$ -метод, к-рый используется при работе с данными, сгруппированными в гистограмму. В этом случае  $Y_n$  есть числа событий в ячейках гистограммы. При больших значениях  $Y_n$  их можно рассматривать как независимые случайные величины,

распределённые по нормальному закону. Если изучаемое распределение есть  $p(x|a)$ , где  $x$  — измеряемая случайная величина,  $a$  — вектор неизвестных параметров, то ср. число событий в ячейке гистограммы  $\bar{Y}_n(a)$  равно  $M \int_{x_n}^{x_{n+1}} dx p(x|a)$  ( $M$  — полное число событий),

а дисперсия  $Y_n$  равна  $\bar{Y}_n(a)$ . Тогда, согласно Н. к. м., оценка  $a$  должна находиться на минимуму выражения

$$\Phi = \sum_{n=1}^N \frac{(Y_n - \bar{Y}_n(a))^2}{\bar{Y}_n(a)} \quad (7)$$

Для упрощения задачи минимизации (7)  $\bar{Y}_n(a)$  в знаменателе (7) часто заменяют на  $Y_n$  (модифицированный  $\chi^2$ -метод). Своё название метод получил по той причине, что при больших  $Y_n$  (приближение нормального распределения)  $\Phi(a = \hat{a})$  распределено по  $\chi^2$ -распределению с числом степеней свободы  $N - I - 1$ .

Если ф-ция  $f(x|a)$  или  $p(x|a)$  величинны, то поиск оценки  $a$  осуществляется одним из методов численной минимизации (1) или (7). Тем не менее можно вылучить ряд асимптотич. свойств (при  $N \rightarrow \infty$ ) оценки Н. к. м.

Оценка Н. к. м. состоятельна, т. е. при  $N \rightarrow \infty$  один из корней системы ур-ний  $\partial \Phi / \partial a_i = 0$  сходится к точному значению  $a$ . Оценка Н. к. м. асимптотически распределена по нормальному закону. Однако матрица ошибок  $\hat{a}$  больше обратной к информат. матрице (см. *Максимального правдоподобия метод*), т. е. оценка Н. к. м. не является эффективной. При конечных  $N$  оценка Н. к. м. является смещённой и неэффективной. Эфф. способ изучения её свойств является *Монте-Карло метод*: задавая значение  $a$  из области возможных значений, получают выборку  $Y_n$ ; по  $Y_n$  находят оценку  $\hat{a}$  и строят выборочные среднее  $\bar{a}$  и матрицу ошибок (в общем случае, выборочное распределение). Отметим, что на практике широко используют приближённое выражение для матрицы ошибок

$$K_{ij} = \sum_{n=1}^N \frac{\partial f(x_n | a)}{\partial a_i} \cdot \frac{1}{a_n} \cdot \frac{\partial f(x_n | a)}{\partial a_j}$$

В том частном случае, когда распределение  $Y_n$  является многомерным нормальным распределением, ковариат. матрица к-рого не зависит от  $a$ , Н. к. м. совпадает с методом макс. правдоподобия. В этом случае оценка Н. к. м. обладает оптич. свойствами, присущими оценке максимума правдоподобия. Кроме того,  $\Phi(a = \hat{a})$  распределено по  $\chi^2$ -распределению с числом степеней свободы  $N - I$ .

Для нелинейных  $f(x|a)$  и  $p(x|a)$  широко использование Н. к. м. обусловлено двумя причинами: 1) метод не требует знания ф-ции распределения  $Y_n$ , а лишь среднего  $M(Y_n) = \int f(x_n|a)$  и матрицы ошибок  $\Sigma$ ; 2) задача минимизации квадратичных форм (1) и (7) значительно проще задачи минимизации ф-ции более общего вида, к-рые появляются в др. методах оценивания.

Лит.: 2 и 3 и 4 Ю. В., Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений, 2 изд., М., 1962; К л е н и о в Н. П., С о к о л о в С. Н., Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия, М., 1964; К у т с о в Д., Статистика для физиков, пер. с англ., М., 1970; Р а с с В. Р., Линеиные статистические методы и их применения, пер. с англ., М., 1968; Статистические методы в экспериментальной физике, пер. с англ., М., 1976. В. Н. Жгуарков, С. В. Калмыков.

**НАЙКВИСТА ФОРМУЛА** — соотношение, описывающее распределение по частотам тепловых флуктуаций тока при напряжения в квазистационарной пассивной электрч. цепи. Установлена Х. Найквистом (Н. Nyquist) в 1927, к-рый показал, что флуктуации тока в цепи можно рассматривать как следствие флуктуаций случайной эдс, локализованной в цепи.

Согласно Н. ф., спектральная плотность  $(E^2)_\omega$  временной корреляционной функции  $\langle E(t)E(0) \rangle$  (флуктуаций) случайных эдс  $E(t)$  в произвольной квазиста-

ционарной пассивной электрч. цепи с импедансом  $Z(\omega)$  равна

$$(E^2)_\omega = 2kTRR(\omega), \quad R(\omega) = \text{Re}Z(\omega),$$

где  $(E^2)_\omega$  связана с корреляц. ф-цией эдс соотношением

$$\langle E(t)E(0) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega (E^2)_\omega \exp(-i\omega t).$$

Спектральная плотность флуктуаций тока

$$(I^2)_\omega = 2kTRR(\omega)/|Z(\omega)|^2,$$

т. к. в линейной цепи  $E_\omega = Z(\omega)I_\omega$ , где  $E_\omega$  и  $I_\omega$  — фурье-компоненты  $E(t)$  и  $I(t)$ . Необходимое для вывода Н. ф. условие квазистационарности выполняется, если размеры электрч. цепи малы по сравнению с длиной волны  $\lambda \sim c/\omega$ ; тогда ток одинаков для всех участков цепи.

Н. ф. справедлива для достаточно низких частот и высоких темп-р, когда  $\hbar\omega \ll kT$  и можно пренебречь квантовыми эффектами. Если это условие не выполнено, имеет место обобщённая Н. ф., выведенная Х. Калленом (H. B. Callen) и Т. Уэлтоном (Th. A. Welton) в 1951, согласно к-рой

$$(E^2)_\omega = \text{cth}(\hbar\omega/2kT)\hbar\omega R(\omega),$$

$$(I^2)_\omega = \text{cth}(\hbar\omega/2kT)\hbar\omega R(\omega)/|Z(\omega)|^2;$$

спектральные плотности  $(E^2)_\omega, (I^2)_\omega$  в этом случае определяются по отношению к симметризованным временным корреляц. ф-циям вида  $(1/2)\langle E(t)E(0) + E(0)E(t) \rangle$  (аналогично для тока). Эти ф-лы являются частным случаем флуктуационно-диссипативной теоремы, к-рая определяет связь между флуктуациями системы в равновесном состоянии и её диссипативными свойствами.

Из Н. ф. следует, что флуктуации тока связаны с диссипацией в цепи и системы, не обладающие активным сопротивлением, не содержат источника теплового шума. Н. ф. применима только к достаточно хорошим проводникам, для к-рых на данной частоте  $\omega$  можно пренебречь влиянием тока смещения. Если не учитывать этого обстоятельства, то Н. ф. приводит к парадоксу, стремлению флуктуаций к бесконечности при разрыве цепи ( $R \rightarrow \infty$ ). Учёт влияния тока смещения изменяет Н. ф. и снимает этот парадокс.

Н. ф. является частным случаем общей теории эл.-магн. флуктуаций (см. *Флуктуации*), к-рая основана на ур-ниях Максвелла с источником случайного шума, подобных ур-нию Лапжевена в теории броуновского движения.

Лит.: Л а в а у д Д. Д., Л и ф ш и ц Е. М., Физическая теория шума, 2 изд., М., 1962, гл. 14; Л е в и н М. Л., Физика в электродинамике, М., 1967, гл. 6; Введение в статистическую радиофизику, ч. 1 — Р и т о в С. М., Случайные процессы, М., 1976; Л и ф ш и ц Е. М., Л и т а в с к и й Л. П., Статистическая физика, ч. 2, М., 1978, гл. 8. Д. И. Зубарев.

**НАКАЧКА** в квантовой электронике — процесс создания неравновесного состояния вещества под воздействием эл.-магн. полей, при соударениях с заряженными или нейтральными частицами, при резком охлаждении предварительно нагретых газовых масс и т. п. Н. переводит вещество из состояния термодинам. равновесия в активное состояние (с инверсией населённости), в к-ром оно может усиливать и генерировать эл.-магн. волны (см. *Квантовая электроника, Лазер*). Термин «Н.» применяется также в радиотехнике и оптике для обозначения процессов воздействия на элементы параметрч. систем. Н. наз. и воздействие циркулярно поляризованным оптич. излучением на систему парамагн. частиц, находящихся в магн. поле, с целью изменения разности населённости магн. эеменовских подуровней энергии (см. *Времяна эффект, Квантовые стандарты частоты, Квантовый магнито-метр*).

В классической трёхуровневой системе (рис. 1) для инверсии населённости квантовых уровней энергии в процессе  $H$ , эл.-магн. волна насыщает квантовый переход между нижним ( $\varphi_1$ ) и верхним ( $\varphi_3$ ) уровнями. Насыщение заключается в выравнивании населённости этих уровней. В условиях насыщения перехода  $\varphi_1 - \varphi_3$  населённость уровня  $\varphi_2$  может быть или больше, или меньше населённости уровней  $\varphi_1$  и  $\varphi_3$ . В результате возникает



рис. 1. Накачка трёхуровневой системы: распределение населённости уровней равновесное (а) и в условиях накачки перехода  $\varphi_1 - \varphi_3$  (б).

инверсия населённости на одном из переходов  $\varphi_1 - \varphi_2$  или  $\varphi_2 - \varphi_3$ . Интенсивность эл.-магн. поля  $H$  должна быть такой, чтобы индуциров. квантовые переходы происходили значительно чаще, чем релаксация переходов с уровня  $\varphi_2$  на уровни  $\varphi_1$  и  $\varphi_3$ . Трёхуровневая схема накачки применяется в квантовых усилителях радиодиапазона (мазеры) и в оптич. квантовых генераторах (лазеры) на рубине. В последнем случае возможна работа только в импульсном режиме, т. к. для насыщения оптич. квантового перехода в твёрдом теле требуются очень большие плотности энергии  $H$ , вызывающие при дпт. воздействие сильный разогрев и разрушение рубинового стержня (см. *Теоретический лазер*).

Возможны более сложные схемы  $N$  квантовых систем, напр. четырёхуровневая схема  $N$  лазера на ионах неодима. Осуществить насыщение квантовых переходов в оптич. диапазоне с помощью безлазерных тепловых источников  $N$  очень трудно. С др. стороны, в условиях теплового равновесия при обычных темп-рах практически все квантовые частицы находятся на самом ниж. уровне. Выбрав вещество с четырьмя уровнями энергии, при благоприятных соотношениях скоростей релаксация переходов между уровнями можно получить инверсию разности населённости уровней  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  (рис. 2) и



рис. 2. Накачка четырёхуровневой системы: распределение населённости уровней равновесное (а) и в условиях накачки перехода  $\varphi_1 - \varphi_4$  (б).

без насыщения переходов  $\varphi_1 - \varphi_4$  или  $\varphi_1 - \varphi_3$ . Накачивая переход  $\varphi_1 - \varphi_4$ , можно получить инверсию на переходе  $\varphi_2 - \varphi_3$ , если скорость релаксация, процессов между уровнями  $\varphi_3 - \varphi_2$  и  $\varphi_3 - \varphi_1$  значительно меньше скорости релаксации между уровнями  $\varphi_2$  и  $\varphi_1$ . Под действием  $H$  частицы переходят с уровня  $\varphi_4$  на уровень  $\varphi_1$  и затем в результате релаксация, процесса попадают на уровень  $\varphi_3$ ,

где накапливаются. В то же время уровень  $\varphi_2$  остаётся практически пустым, поскольку все частицы, попадающие на него, быстро переходят на уровень  $\varphi_1$ .

Н. *газовых лазеров* осуществляется постоянным или импульсным током. Энергия  $N$  передается свободным электронам, к-рые сталкиваются с атомами или молекулами, ионизируют или возбуждают их. Одновременно идёт обратный процесс рекомбинации электронов и ионов с образованием возбуждённых частиц. Возбуждённые частицы сталкиваются между собой и с невозбуждёнными частицами, обмениваются энергией возбуждения и переходят на др. уровни энергии. В результате в газоразрядной плазме наблюдается широкий спектр возбуждений и возможен инверсные состояния — разл. квантовых переходов в диапазоне волн от долей миллиметра до долей микрометра.

В результате хим. и фотохим. реакций в газах также образуются ионы, атомы или молекулы в возбуждённом состоянии. Последующие хим. превращения в релаксация, процессы часто приводят к инверсии населённости или неосредств. продуктом реакции, или специально введённых примесей с подходящей структурой энергетич. уровней. Газоразрядные лазеры и хим. лазеры могут иметь очень большой (до 50%) коэф. преобразования мощности  $N$  в мощность лазерного излучения.

Н. *гетеролазеров* осуществляется постоянным (или импульсным) током. Под действием сильного прямого тока через  $p - n$ -переход происходит диффузия носителей заряда в зону  $p - n$ -перехода и повышается их концентрация до такой степени, что плотность занятых уровней вблизи дна зоны проводимости становится больше плотности занятых уровней вблизи потолка валентной зоны. Т. о. создается инверсия разности населённости уровней в узкой зоне вблизи  $p - n$ -перехода. Гетеролазеры также отличаются большим кд (до 50%). Др. высококоэф. способом  $N$  полупроводникового лазера является возбуждение кристалла электронным пучком с энергией  $10^6 - 10^8$  эВ. Электронный пучок проникает значит. толщину кристалла и производит в его объёме ионизацию с образованием электрон-дырочных пар с достаточной для лазерной генерации концентрацией. Кд лазера с электронно-пучковой  $N$  может достигать 30% при мощности излучения до 1 МВт.

В параметрич. устройствах радиодиапазона  $N$  осуществляет периодич. изменение величины ёмкости или индуктивности колебат. контура или резонатора. Если ёмкость конденсатора уменьшается в те моменты, когда заряд на нём максимален, и вновь увеличивается, когда заряд отсутствует, то энергия, накопленная в контуре, периодически усиливается за счёт  $N$ . В рассмотренном простейшем случае частота воздействия  $N$  вдвое превышает собств. частоту контура, на к-рой происходит усиление или генерация. Этот эффект наз. параметрич. усилением и используется в усилителях и генераторах радиодиапазона (см. *Параметрическая генерация и усиление электромагнитных колебаний*).

Аналогичные явления можно наблюдать и в оптич. диапазоне при воздействии на величину оптич. среду мощной волны  $N$ , возбуждающей бегущую волну изменяющегося показателя преломления. Эта волна при благоприятных условиях порождает вторичную эл.-магн. волну на частоте, отличной от частоты  $N$ . Условиями возникновения вторичной волны являются превышение плотности энергии волны  $N$  над определённым пороговым значением, фазовый синхронизм вторичной волны и волны изменения показателя преломления. Последнее условие может быть реализовано только в анизотропных средах (кристаллах) или в средах с аномальной дисперсией.

Н.  $на$  также оптич. волну, порождающему нелинейные оптич. эффекты, связанные с изучением вторичных когерентных волн, в т. ч. вынужденное комбинац. рассеяние и вынужденное рассеяние Манделштама — Бриллюана.

Лит.: Яри в А., Квантовая электроника, пер. с англ., 2 изд., М., 1980; З в е л т о О., Физика лазеров, пер. с англ., 2 изд., М., 1984; Кар л о в Н. В., Лоски н о квантовой электроники, 2 изд., М., 1988; П е н И. Р., Принципы физической оптики, пер. с англ., М., 1989. А. В. Фроловский.

**НАКОПИТЕЛИ** заряженных частиц (накопительные кольца) — циклич. ускорители заряд. частиц, предназначенные для накопления и (или) длит. удержания (часы, дни) пучка заряд. частиц на стационарной орбите при пост. энергии. По принципиальной схеме Н., как правило, являются синхротронами — электронными или протонными (см. *Синхротрон*, *Синхротрон протонный*). Их конструкция позволяет в течение заданного времени поддерживать с высокой стабильностью уровень магн. поля, параметры ВЧ-системы, сверхвысокий вакуум и т. д., что обеспечивает пучковую стабильность параметров пучков, циркулирующих в Н.

Н. применяются в физике высоких энергий — метод *стрелы пучков* [1], в ядерной физике — в экспериментах по рассеянию заряд. частиц высокой энергии на внутр. мишенях [2,3], как источники *синхротронного излучения* (Н. электронов и позитронов) [4], для формирования пучков, содержащих большое кол-во редких частиц, для формирования сгустков нужной протяженности (накопитель-группирователи) и для создания квазипрерывного выходного пучка ускоренных частиц (накопитель-растягиватели). Н. позволяют изменять энергию частиц (ускорять или замедлять их) в пределах, предусмотренных его конструкцией.

Накопление частиц приводит к увеличению фазового объема, занимаемого пучком (эммитанса), если оно не сопровождается охлаждением частиц (см. *Охлаждение пучков* заряженных частиц). Накопление возможно как в поперечном, так и в продольном фазовых объемах. В обоих случаях — при отсутствии охлаждения — фазовые объемы накапливаемых пучков складываются (или увеличиваются ещё быстрее). Растяжение пучка применяется для увеличения полезного времени, используемого экспериментаторам, работающими на ускорителях, группирующих частицы в короткие, далеко расставленные импульсы, т. е. на ускорителях с плохим временным фактором, напр. на линейных ускорителях. В простейших кольцевых растяжителях сгустки частиц из ускорителя совершают в растяжителе большое число оборотов в отсутствие ускоряющего ВЧ-напряжения. При этом продольный размер пучка возрастает за счёт собств. разброса скоростей. Затем частицы выводятся из Н. системой медленного вывода (см. *Вывод пучка*).

Лит.: 1) Буд к е р Г. И., Ускорители со вращающимися пучками частиц, «УФН», 1986, т. 49, № 3, к в и с к и я А. Н., Ускорительные перспективы физики элементарных частиц, «УФН», 1982, т. 43, с. 3; 2) Буд к е р Г. И. и др., Возможности спектроскопических экспериментов на сверхтонких внутренних мишенях в накопителях тяжелых заряженных частиц с атомным охлаждением, в сб.: Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Серпухов, 1977; 3) Поп о в С. Г., Эксперименты с внутренней мишенью в накопителе заряженных частиц, в сб.: Труды V семинара «Электронные взаимодействия ядер при малых и средних энергиях», 1981, М., 1982; 4) К у л и п а н о в Г. Н., С к р и н с к и я А. Н., Исследование синхротронного излучения: состояние и перспективы, «УФН», 1977, т. 122, с. 369.

**НАКОПИТЕЛЬНЫЕ КОЛЬЦО** — устройство, предназначенное для накопления ускоренных заряд. частиц на устойчивых орбитах. См. *Накопители*.

**НАМАГНИЧЕННОСТЬ** — характеристика магн. состояния макроскопич. тела; средняя плотность магн. момента  $M$ , определяется как магн. момент  $I$  единицы объема:  $M = I/V$ . Предел  $M = dI/dV$  ( $dI$  — магн. момент физически бесконечно малого объема  $dV$ ), намагниченность среды в точке. Н. однородна в пределах рассматриваемого объема, если в каждой его точке  $M$  имеет одну и ту же величину и направление. Единица Н. в Международной системе единиц — ампер на метр ( $1 \text{ А/м} = \text{Н}$ ), при к-рой  $1 \text{ м}^3$  вещества обладает

магн. моментом  $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ , в СГС системе единиц —  $\text{эрг}/(\text{Гс} \cdot \text{см}^3)$ .

Н. вещества зависит от величины магн. поля и темп-ры (см. *Парамагнетизм*, *Диамагнетизм*, *Ферромагнетизм*). Зависимость  $M$  от намагничения внеш. магн. поля  $H$  выражается кривой намагничивания (см. *Намагничивание*, *Гистерезис магнитный*). Н. тела зависит от напряженности внеш. поля  $H$ , магн. свойств вещества этого тела, его формы и расположения во внеш. поле. Между намагничением  $H_n$  в веществе  $H_n$  и полем  $H$  существует соотношение:  $H_n = H - NM$ , где  $N$  — *размагничивающий фактор*. В изотропных веществах направление  $M$  совпадает с направлением  $H$ , в анизотропных — направление  $M$  и  $H$  в общем случае различны.

Лит.: В о н с о в с к и я С. В., Магнетизм, М., 1974; П а р с е л л Э., Электричество и магнетизм, пер. с англ., 3 изд., М., 1983.

**НАМАГНИЧЕННОСТЬ ОСТАТОЧНАЯ** — намагниченность  $M_r$  предварительного намагниченного магнитного материала при уменьшенной до нуля напряженности магн. поля. Величина  $H_0$  о. зависит от мн. факторов: магн. свойств материала, его магн. предистории, темп-ры.  $H_0$  о. возрастает с увеличением напряженности намагничивающего поля, стремясь к предельному значению, к-рое и принимают за  $H_0$  о. данного материала. Последнюю следует отличать от  $H_0$  о. тела (образца), т. е. от значения его ср. намагниченности при равной нулю напряженности внеш. магн. поля. Поскольку в этом состоянии на тело действует собств. намагничивающее поле, его  $H_0$  о. всегда меньше  $H_0$  о. материала. Чем больше *размагничивающий фактор* тела, тем меньше его  $H_0$  о. Для определения  $H_0$  о. материала создают условия, при к-рых равна нулю напряженность внутр. поля в образце. Удобно сравнивать  $H_0$  о. разл. материалов, пользуясь относительной  $H_0$  о.  $j_r = M_r/M_s$ , где  $M_s$  — намагниченность технического насыщения  $j_r \approx 1$ , что достигается созданием в них *магнитной текстуры*.  $H_0$  о. уменьшается при колебаниях темп-ры, механич. сотрясениях и вибрациях. Наиб. устойчива  $H_0$  о. в *магнитно-твёрдых материалах*, благодаря чему они находят широкое практич. применение (см., напр., *Магнит постоянный*).

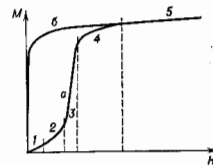
Лит. см. при ст. *Намагничивание*, *Гистерезис магнитный*. А. С. Ермаков.

**НАМАГНИЧИВАНИЕ** — совокупность процессов, происходящих в *магнитных материалах* под действием магн. поля  $H$  и приводящих к росту *намагниченности*  $M$  (или *магнитной индукции*  $B$ ) материала. В ферроили ферри магн. материалах различают три механизма Н.: смещение границ между магн. доменами, вращение вектора спонтанной намагниченности  $M_0$  и *парапроцесс*.

В намагниченом состоянии ферромагнетик разбивается на отд. области — *домены*, в пределах к-рых материал намагичен до насыщения вдоль одной из осей *лёгкого намагничивания*. Ввиду разл. ориентация намагниченности в доменах суммарный *магнитный момент* образца равен нулю. Под влиянием внеш. магн. поля происходит рост областей, в к-рых  $M_0$  составляет наиб. угл. с являвлением поля, за счёт соседних областей. Этот рост осуществляется в результате смещения доменных границ (*доменных стенок*). После завершения процессов смещения в каждом кристалле остаётся всего лишь один домен, намагниченность к-рого ориентирована вдоль ближайшей к направлению поля оси лёгкого Н. Дальнейшее Н. идёт за счёт вращения векторов  $M_0$  к направлению магн. поля. По завершении процесса вращения в образце достигается т е х и ч е с к о е *магнитное насыщение*, и притом намагиченность может иметь место лишь за счёт *парапроцесса* — увеличения самой намагиченности насыщения вследствие подавления магн. полем тепловых колебаний элементарных магн. моментов вещества.

Зависимость  $M(H)$  или  $V(H)$ , представленная в виде ф-л, графиков или таблиц, наз. кривой намагничивающей. Если известна кривая  $M(H)$ , то простым пересчётом может быть получена и кривая  $V(H)$ , и наоборот. Вид зависимости  $M(H)$  определяется магн. свойствами материала, условиями измерений (давление, темп-ра, характер изменения магн. поля), формой образца, его магн. предисторией. Важнейшими видами кривых  $H$  являются следующие.

I. Кривая первого (первоначального) намагничивания (КПН) получается при  $H$  ферро- или ферромагнетика из полностью размагниченного состояния монотонно возрастающим от нуля магн. полем, причём направление последнего относительно намагничиваемого тела остаётся неизменным. На КПН можно выделять пять участков, на каждом из которых преобладает определ. механизм. Участок I (рис.) соответствует обратным



Кривая начального намагничивания (а) и безгистерезисная кривая намагничивания (б).

соответствует обратным (упругим) сдвигам доменных границ: здесь  $M = \chi_a H$ , где  $\chi_a$  — нач. магнитная восприимчивость. В области Рэлея (2) имеют место вряду с обратными также необратимые процессы сдвигания, и зависимость  $M(H)$  здесь квадратична (см. Релея закон намагничивания). Наиб. крутой участок КПН (3) соответствует макс. восприимчивости и связан с необратимыми сдвигами доменных границ. В области приближения к насыщению (4) осн. роль играют процессы вращения  $M_s$  в направлении намагничивающего поля. Наконец, участок 5 характеризуется слабым ростом намагниченности и соответствует парапроцессу.

II. При циклическом изменении  $H$  и  $M$  кривые  $M(H)$  сначала несколько изменяются от цикла к циклу (см. Магнитная аккомодация), во постепенно становятся стабильными. Их наз. кривыми циклического перематывания или петлями гистерезиса магнитного. При  $H_1 = -H_2$  петля гистерезиса симметрична, в других случаях — асимметрична. Наиболее симметричная петля гистерезиса наз. предельной и является важной характеристикой магнитных материалов.

III. Безгистерезисная (идеальная) кривая  $H$  изображает зависимость  $M(H)$  для таких состояний, к-рые при каждом значении  $H$  являются наиб. устойчивыми, т. е. обладают наиб. свободной энергией. Эти состояния могут быть получены в результате наложения на пост. поле  $H$  перем. магн. поля с убывающей до нуля амплитудой.

IV. Основная (коммутационная) кривая  $H$  — геом. место вершин симметричных петель гистерезиса. Основная и безгистерезисная кривые  $H$ , в отличие от КПН, фиксируют только избранные магн. состояния, не показывая действительных процессов  $H$ .

Если значения  $M$  и  $H$  относятся к одному и тому же элементу объёма, то кривые  $M(H)$  не зависят от размера и формы образца и являются кривыми  $H$  данного материала. На практике чаще всего имеют дело не с истинным значением  $H$  внутри образца, а с напряжённостью внеш. магн. поля  $H_e$ . Кривые  $M(H_e)$  наз. кривыми намагничивания. В простых случаях, зная размагничивающий фактор тела, можно из кривых  $M(H_e)$  получить кривые  $M(H)$ .

Лит.: Преображенский Я. А., Виноградский Е. Г., Магнитные материалы и элементы, 3 изд., М., 1986; Воронцовский С. В., Магнетизм, М., 1971. А. С. Ермоленко.

НАМАГНИЧИВАЮЩАЯ СИЛА — то же, что намагничивающая сила.

НАНО... (от греч. *пáнос* — карлик) — приставка к наименованию единицы измерения для образования дробной единицы, составляющей  $10^{-9}$  от исходной единицы. Обозначения: н, п. Пример: 1 нм (нанометр) =  $10^{-9}$  м.

НАПОР в гидравлике — линейная величина, выражающая удельную (отнесённую к единице веса) энергию потока жидкости в данной точке. Полный запас уд. энергии потока  $H$  (полный  $H$ .) определяется Бернулли уравнением

$$H = z + \frac{v_0}{g} + \frac{p_0}{\rho g},$$

где  $z$  — высота рассматриваемой точки над плоскостью отсчёта,  $p_0$  — давление жидкости, текущей со скоростью  $v$ ,  $\gamma$  — уд. вес жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения. Два первых слагаемых трёхчлена определяют собой сумму уд. потенциальных энергий положения ( $z$ ) и давления ( $p_0/\gamma$ ), т. е. полный запас уд. потенц. энергии, наз. гидростатическим  $H$ ., а третье слагаемое — уд. кинетич. энергию (скоростной  $H$ .). Вдоль потока  $H$  уменьшается. Разность  $H$  в двух поперечных сечениях потока реальной жидкости  $H_1 - H_2 = h_z$  наз. потерями  $H$ . При движении вязкой жидкости по трубам потерный  $H$  вычисляется по Дарси — Вейсбаха формуле.

НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ КОЭФФИЦИЕНТ — отношение мощности, излучаемой антенной в данном направлении, к мощности, излучаемой в том же направлении нек-рой эталонной направленной антенной при условии равенства полных мощностей, излучаемых обеими антеннами (см. Антенна, Диаграмма направленности).

НАПРАВЛЕННОСТИ ДИАГРАММА электромагнитных излучателей и приёмников, см. Диаграмма направленности.

НАПРАВЛЕННОСТЬ акустических излучателей и приёмников — нек-рая пространственная избирательность излучателей и приёмников, т. е. способность излучать (принимать) звуковые волны в одних направлениях в большей степени, чем в других. В режиме излучения  $H$  обуславливается интерференцией звуковых колебаний, приходящих в данную точку среды от отд. участков излучателя (в случае многоэлементной акустич. антенны — от отд. элементов антенны). В режиме приёма  $H$  вызывается интерференцией давлений на поверхности приёмника, а в случае приёмной акустич. антенны — также и интерференцией развиваемых приёмными элементами электрич. напряжений при падении звука из нек-рой точки пространства. В нек-рых случаях, напр. у рефлекторных, рупорных и лизовых антенн, в создании  $H$  кроме интерференции существ. роль играет и дифракция волн. Аналогичные физ. явления вызывают  $H$  эл.-магн. излучателей и приёмников (Н. эл.-магн. антенн), поэтому в теории направленности акустич. и эл.-магн. антенн много сходных понятий, определений и теорем. В зависимости от матем. модели, к-рой можно описать данный излучатель (см. Излучение звука), для расчёта его  $H$  используются разл. теоретич. методы. В случае наиб. простой модели, представляющей собой дискретную (или непрерывную) совокупность малых по сравнению с длиной волны  $\lambda$  излучающих элементов, поле излучателя определяется суммированием (или интегрированием) сферич. волн, создаваемых отд. элементами. Для плоских излучателей, заключённых в бесконечные плоские экраны, применяется принцип Гюйгенса. После сложных цилиндров, или сферич. излучателей определяется с помощью метода собств. ф-ций. Наиб. общие теоретич. методы основаны на использовании ф-ций Грина.

Н. излучателей и приёмников звука описывают чаще всего двумя параметрами: характеристич.

кой направленности и коэф. концентрации и (наз. также коэф. направленного действия). Характеристикой Н. излучателя называется представленное в ф-ции направления отност. значение звукового давления  $p$ , создаваемого им на фиксиров. расстоянии  $r$  в дальнем поле (т. е. при  $r \gg 2d^2/\lambda$ , где  $d$  — наиб. размер излучающей поверхности). Направление задается единичным радиусом-вектором  $\mathbf{n}$  (или углами  $\varphi, \theta$ ); значение звукового давления отност. как направлению, так давлению в направлении макс. излучения  $\varphi_0(\varphi_0, \theta_0)$ . Т. о., характеристика Н. излучателя выражается как

$$D_{изл}(\mathbf{n}) = \frac{p(\mathbf{n})}{p(\mathbf{n}_0)} = \frac{r(\varphi, \theta)}{r(\varphi_0, \theta_0)}$$

Характеристикой Н. приёмника наз. его отност. чувствительность  $\gamma$  (см. *Приёмники звука*), выражаемую в ф-ции направления прихода звуковой волны. Чувствительность отност. обычно к её значению в направлении макс. приёма, так что характеристика Н. по приёму имеет вид

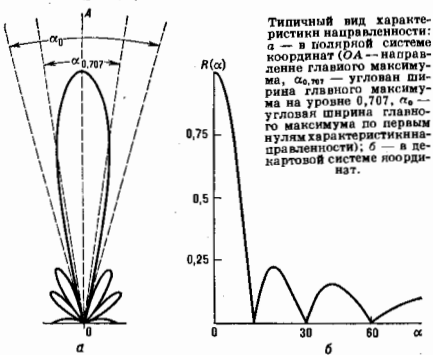
$$D_{пр}(\mathbf{n}) = \frac{\gamma(\mathbf{n})}{\gamma(\mathbf{n}_0)} = \frac{\gamma(\varphi, \theta)}{\gamma(\varphi_0, \theta_0)}$$

Для обратимых преобразователей (антенн) характеристики Н. при работе в режиме излучения и в режиме приёма совпадают:

$$D_{изл}(\mathbf{n}) = D_{пр}(\mathbf{n}) = D(\mathbf{n})$$

Наиб. практич. интерес представляет модуль характеристики Н.  $|D(\mathbf{n})| = R(\alpha)$ , наз. также амплитудной характеристикой Н.

Характеристику Н. в сечении нек-рой плоскостью, проходящей через направление макс. излучения (диаграмму Н.), представляют в полярной (рис. а) или в декартовой (рис. б) системах координат. В этом случае



Типичный вид характеристики направленности: а — в полярной системе координат (ОА — направление главного максимума,  $\alpha_{0,707}$  — угловая ширина главного максимума на уровне 0,707,  $\alpha_0$  — угловая ширина главного максимума по первому нулю характеристики (направленности); б — в декартовой системе координат.

аргументом характеристики Н. обычно является угол, отсчитываемый от направления макс. излучения, и характеристика Н. представляется в виде ф-ции  $R(\alpha)$ . Различают след. осн. области и параметры характеристики Н.: главный (основной) и добавочный максимумы (лестнич. диаграммы Н.); ширина гл. максимума по уровню 0,7; ширина по направлению нулевого излучения; величина добавочных максимумов (по отношению к главному).

Коэф. концентрации  $K$  — мера концентрации излучаемой мощности в нек-ром направлении пространства (обычно в направлении  $\mathbf{n}_0$ ). Определяется он отношением интенсивности звука, создаваемого рассматриваемым излучателем в направлении  $\mathbf{n}_0$  на расстоянии  $r > 2d^2/\lambda$ , к интенсивности, создаваемой в той же точке

гипотетич. ненаправленным излучателем с такой же излучаемой мощностью. Ф-лы для расчёта коэф. концентрации имеют вид

$$K = \frac{4\pi}{\int_0^{\Omega} R^2(\mathbf{n}) d\Omega}; \quad K = \frac{4\pi}{\rho c} \frac{|p(\mathbf{n}_0)|^2}{W}$$

где  $\Omega$  — полный телесный угол,  $\rho c$  — волновое сопротивление среды,  $W$  — мощность излучателя.

В режиме приёма коэф.  $K$  характеризует помехоустойчивость приёмника в поле изотропных помех, источники к-рых независимы; он равен отношению макс. создаваемого помех на выходе ненаправленного и рассматриваемого направленного приёмников в указанном поле при условии равенства их чувствительности.

В первом приближении чем больше волновые размеры излучателя (отношение геом. размеров к длине волны), тем меньше ширина его характеристики Н. и тем больше  $K$ . При размерах активной поверхности, больших  $\lambda$ , для плоского поршня  $K = 4\pi S/\lambda^2$  (где  $S$  — площадь поршня), а для антенны в виде отрезка прямой  $K = 2l/\lambda$  ( $l$  — длина отрезка).

В табл. приведены ф-ции, описывающие характеристики Н. нек-рых простейших непрерывных излучателей и дискретной эквидистантной решётки, состоящей из ненаправленных излучателей (монополей). Символами  $\alpha_{0,7}$  и  $\alpha_0$  обозначены углы, равные ширине

ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НАПРАВЛЕННОСТЬ ПРОСТЕЙШИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ЗВУКА

Тип излучателя		$D(\alpha)$	$\alpha_{0,7}$	$\alpha_0$	$\sigma_1$
Название	Внешний вид				
Отрезок прямой		$\frac{\sin \alpha}{\alpha}$	$50^\circ \frac{\lambda}{d}$	$15^\circ \frac{\lambda}{d}$	0,22
Прямоугольный поршень в экране		$\frac{2J_1(x)}{x}$	$59^\circ \frac{\lambda}{d}$	$128^\circ \frac{\lambda}{d}$	0,13
Круглый поршень в экране		$J_0(x)$	$41^\circ \frac{\lambda}{d}$	$81^\circ \frac{\lambda}{d}$	0,40
Окружность		$\cos \alpha$	$28^\circ \frac{\lambda}{d}$	$58^\circ \frac{\lambda}{d}$	
Два монополя		$\frac{\sin 2\alpha}{2 \sin \alpha}$	$36^\circ \frac{\lambda}{2d}$	$76^\circ \frac{\lambda}{2d}$	0,33
Три монополя		$\frac{\sin 3\alpha}{3 \sin \alpha}$	$50^\circ \frac{\lambda}{3d}$	$15^\circ \frac{\lambda}{d}$	0,22
$n$ — монополей		$\frac{\sin n\alpha}{n \sin \alpha}$	при $n \rightarrow \infty$ $50^\circ \frac{\lambda}{d}$	$15^\circ \frac{\lambda}{d}$	0,22

характеристики Н. на уровне 0,7 и на нулевом уровне соответственно, а также приведены приближённые ф-лы, определяющие эти величины;  $\sigma_1$  — уровень первого добавочного максимума характеристики Н.;  $z$  — обобщённый параметр, равный  $(\pi d/\lambda) \sin \alpha$ . Угол  $\alpha$  отсчитывается от перпендикуляра к плоскости излучателя, символами  $J_0(x)$  и  $J_1(x)$  обозначены ф-ции Бесселя первого рода, нулевого и первого порядков. Как правило, характеристики Н. непрерывных антенн, излучающих одной стороной, т. е. имеющих тыльный акустич. экран, обладают одним максимумом, равным единице, — главным. Особенностью характеристик Н. эквидистантной линейной решётки, состоящей из монополей, является наличие (при периоде решётки  $d$ , большем  $\lambda$ ) виск. максимумов, равных единице. Н. рефлекторных и лязвовых



антенны в первом приближении совпадает с  $N$ . плоской антенны, размеры  $k$ -рой равны размерам поперечного пучка в раскрыве рефлектора или лямпы.

Во мн. случаях анализа  $N$ . сложных излучателей и приёмников существенно упрощается при использовании теорем о  $N$ .: умножения, смещения и сложения. Так, в соответствии с теоремой умножения характеристика  $N$ . антенны, состоящей из одинаковых, ориентированных в пространстве элементов, равна произведению характеристик  $N$ . одного элемента в гипотетич. антенны, состоящей из монополей, расположенных в центрах реальных элементов.

$N$ . излучателей зависит от амплитудно-фазового распределения колебат. скорости их активной поверхности. Так, напр., уменьшение амплитуды колебат. скорости от центра к краям плоского излучателя приводит к расширению осн. максимума характеристики  $N$ . и уменьшению добавочных, а увеличение амплитуды от центра к краям — к уменьшению ширины осн. максимума и увеличению добавочных. Коэф. концентрации при введении неравномерного амплитудного распределения несколько уменьшается. Среди разл. фазовых распределений следует отметить распределение, обеспечивающее синфазное сложение давлений от отд. участков излучателя в век-ром направлении пространства  $\omega_0$ , т. е. «компенсацию» антенны в этом направлении. В случае плоской или линейной антенны в виде отрезка прямой распределение, обеспечивающее т. п. комплексацию, является линейным. Введение фазовой задержки сигнала возбуждения элемента линейной антенны с координатой  $z$  на величину  $(2\pi/\lambda)z \sin \alpha$ , приводит к повороту гл. максимума характеристики  $N$ . на угол  $\alpha$ . Меняя величину задержки, можно обеспечить скашивание характеристики  $N$ . внутри некоего угла в пространстве.

Существуют методы решения обратных задач теории антенн (синтеза антенн), позволяющие определить амплитудно-фазовое распределение, обеспечивающее формирование характеристики  $N$ ., приближающейся в какой-то мере к заданной, или достижение экстремального значения к-л. параметра (напр., максимума коэф. концентрации). В неких случаях решение обратной задачи приводит к острым характеристикам  $N$ . и высоким значениям коэф. концентрации при относительно малых волновых размерах антенны; получаемые таким путём т. н. сверхнаправленные антенны обладают повышенной чувствительностью к случайным ошибкам амплитудно-фазового распределения, а потому практически не реализуемы. Примером умеренно сверхнаправленных антенн, реализуемых практически, являются диполь, а также т. н. кардиоидный приёмник,  $N$ . к-рого имеет вид  $0,5(1 + \cos \alpha)$ .

В твёрдой среде кроме продольных (существующих в газах и жидкостях) возникают и поперечные волны. При этом различают характеристики  $N$ . по продольным и поперечным волнам.

$N$ . акустич. излучателей и приёмников играет значит. роль в гидроакустич., УЗ-дефектоскопии, медицинской ультразвуковой диагностике.

Лит.: Минкович В. М., Яковлев В. П., Теория синтеза антенн, М., 1969; Римский-Корсаков А. В., Электродинамика, М., 1973; Скучин Е., Основы акустики, пер. с англ., т. 1—2, М., 1976; Справочник по гидроакустич. пер. с англ., т. 2 — Радиолокационные антенные устройства, М., 1977; Иоффе В. К., Корольков В. Г., Сапожков В. М. А., Справочник по акустике, М., 1973; Самарин В. М. Д., Добровольский Ю. К., Гидроакустические антенны, Л., 1984.

**НАПРЯЖЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ** — мера внутр. сил, возникающих при деформации материала. Для введения понятия  $N$ . м. мысленно вырезается из среды некий объём, по поверхности  $N$ . к-рого распределены силы взаимодействия с остальной частью среды, возникающие при деформации. Если  $\Delta V$  — равновесная (гл. вектор) сил взаимодействия на элементе поверхности  $\Delta N$ , содержащем рассматриваемую точку  $A$ , то предел отношения  $\Delta P/\Delta N$  при  $\Delta N \rightarrow 0$  наз.

вектором  $\sigma$  напряжения  $S_n$  в точке  $A$  на площадке с нормалью  $n$ . Величина проекции вектора  $N$ . м. на нормаль  $n$  и на касат. плоскость наз. нормальными ( $\sigma_n$ ) и касат. ( $\tau_n$ ) напряжениями.  $N$ . м. ваз. условным, если при его вычислении сила относится к площадке сечения в недеформиров. состоянии, и истинным, если учтено изменение площади при деформации. Чтобы определить напряж. состояние в точке, надо найти величины, по к-рым можно вычислить  $N$ . м. на любой из бесчисленного множества площадок, проходящих через эту точку.

Вектор  $N$ . м.  $S_{ij}$ , действующий на элементарной площадке, перпендикулярной оси  $X_i$ , в проекциях на оси координат  $Ox_1, Ox_2, Ox_3$  обозначают через  $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}$  а для элементарных площадок, перпендикулярных осям  $Ox_2$  и  $Ox_3$  — через  $\sigma_{21}, \sigma_{22}, \sigma_{23}$  и  $\sigma_{31}, \sigma_{32}, \sigma_{33}$ . При этом  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$  — нормальные  $N$ . м., а  $\sigma_{12}, \sigma_{21}, \sigma_{23}, \sigma_{32}, \sigma_{31}, \sigma_{13}$  — касательные  $N$ . м. Шесть величин  $\sigma_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$  образуют тензор напряжений в рассматриваемой точке.  $N$ . м. на любой площадке в той же точке вычисляются через величины  $\sigma_{ij}$ , т. е. тензор  $N$ . м. полностью определяет напряж. состояние в точке. Если известны  $\sigma_{ij}$  как ф-ции координат, то они определяют напряж. состояние всего тела. Напряж. состояние наз. однородным, если  $\sigma_{ij}$  не зависит от координат точки.

Величина  $\sigma = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$  наз. средним (гидростатич.)  $N$ . м. В каждой точке тела есть 3 взаимно перпендикулярные площадки, на к-рых касательные  $N$ . м. равны нулю. Перпендикулярные к ним направления наз. главными осями  $N$ . м. в точке, а нормальные  $N$ . м. на них  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главными  $N$ . м. См. также Девиатор напряжений, Интенсивность напряжений.

Непосредственно  $N$ . м. не измеряется. В однородном напряж. состоянии  $N$ . м. вычисляется через величины действующих на тело сил. В неоднородном напряж. состоянии  $N$ . м. определяется косвенно — по эффектам его действия, напр. по пьезоэлектрич. эффекту, эффекту двойного лучепределения (см. Поляризацонно-оптический метод исследования напряжений).

Лит.: Тимошенко С. П., Гудьер Дж., Теория упругости, пер. с англ., М., 1975.

**НАПРЯЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ** — работа по перемещению единичного электрич. заряда, определяемая интегралом напряжённости эфф. электр. поля  $E_z$  (включающего сторонние поля) вдоль заданного контура  $\gamma$ , соединяющего две точки ( $1, 2$ ) токовой цепи или иной эл.-динамич. системы:

$$u_{12}[\gamma] = \int_{\gamma} E_z dL. \quad (1)$$

Измеряется  $N$ . э. в СИ в вольтах (1 В = 1 Дж/А·с), в СГСЭ — в г<sup>1/2</sup> см<sup>1/2</sup> с<sup>-1</sup>(СГСЭ = 300 В).

Понятие о  $N$ . э. ввёл Г. Ом (G. Ohm), предположивший в 1827 гидродинамич. модель электр. тока для объяснения открытого им эмпирич. закона (см. Закон Ома). Аналог перената давлений между двумя точками цепи Ом назвал напряжением. В своих опытах Ом имел дело только с пассивными участками цепи, не включающими между двумя точками цепи и разность потенциалов между двумя точками цепи и aroseлось по показаниям электроскопа, подключенного к этим точкам. В дальнейшем понятие  $N$ . э. было обобщено на электр. цепи и системы, включающие активные элементы (электродлины, вавны, электромоторы, аккумуляторы, генераторы, контакты разнородных металлов и полупроводников, проводники с неоднородным распределением тем-ры и т. д.). Термин « $N$ . э.» применяется при описании процессов в цепях не только постоянного, но и переменного тока, в линиях передач и антеннах.

В потенц. эл.-статич. полях ( $E = -\nabla\varphi$ )  $N$ . э. между точками  $1, 2$  не зависит от пути интегрирования: в (1) совпадает с разностью потенциалов:  $u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ . В общем случае необходимо указывать контур  $\gamma$  в (1).

Вклад в  $H_z$  непотенциальных полей (вихревых и сторонних) принято относить к *электродвижущей силе*  $\mathcal{E}[\gamma]$ :

$$u_{12}[\gamma] = \Phi_1 - \Phi_2 + \mathcal{E}[\gamma].$$

На практике, однако, вместо точного указания контура интегрирования  $\gamma$  обычно пользуются поясняющими словами. Так, говорят о приложении к элементу цепи (двухполюснику)  $H_z$ , о  $H_z$  на зажимах (клеммах, подводящих проводах) того или иного устройства, о  $H_z$  на входе (плече) многополюсника, понимаем под этим  $H_z$  вдоль кривой, огибающей устройство, т. е. чаще всего разность потенциалов между его полюсами. Если контур  $\gamma$  выбран внутри проводников цепи, то говорят о падении  $H_z$  на участке цепи или двухполюснике.

В ряде случаев, когда эл.-динамич. устройство (напр., электромотор) включает в себя подвижные проводники или когда сторонние силы являются результатом усреднённого воздействия пульсирующих микрополей на быстро осциллирующие носители заряда, падение  $H_z$   $U$  определяется как отношение работы, совершаемой в единицу времени над электр. током  $I$ , к величине тока:

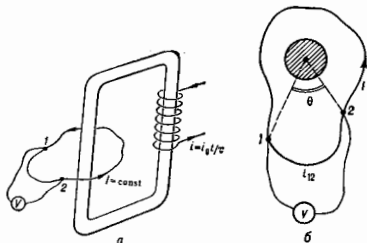
$$U = \int (\mathbf{e} \cdot \mathbf{i}) dV / I,$$

где  $\mathbf{e}$  — напряжённость микроскопич. электр. поля,  $i$  — плотность микротоков, интегрирование производится по объёму проводника  $V$ ,  $\langle \dots \rangle$  — знак усреднения по быстрым движениям;  $\langle \mathbf{e} \rangle = \mathbf{E}$ ,  $\langle i \rangle = j$ , но в общем случае  $\langle \mathbf{e} \cdot \mathbf{j} \rangle \neq \mathbf{E} \cdot j$ , так, в движущихся со скоростью  $\mathbf{v}$  в проводниках  $\langle \mathbf{e} \cdot \mathbf{j} \rangle = \mathbf{E}_0 \cdot j = \mathbf{E} \cdot j + j \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) / c$  ( $\mathbf{B}$  — индукция магн. поля). Определённое т. о. падение напряжения удовлетворяет закону Ома:  $U = RI$ , где  $R$  — сопротивление участка цепи.

В случае гармонич. процессов пользуются след. характеристиками: мгновенным значением  $H_z$ ,  $u(t)$ , определяемым соотношением (1); комплексной амплитудой  $H_z$ ,  $\tilde{u}$  [ $u(t) = \text{Re}\{\tilde{u} \exp(i\omega t)\}$ ] и эфф. значением  $H_z$ ,  $u_0^2 = \tilde{u}^2(t) = |u|^2/2$  (черта сверху означает усреднение по периоду колебаний  $T = 2\pi/\omega$ ,  $\omega$  — циклич. частота). Для комплексных амплитуд  $H_z$  э. и тока закон Ома обобщается в виде

$$\tilde{u} = Z(\omega) \tilde{I}, \quad (2)$$

где  $Z(\omega)$  — *импеданс* двухполюсника. Хотя по форме (2) совпадает с законом Ома,  $\tilde{u}$  при этом не является комплексной амплитудой падения напряжения, а совпа-



дет с комплексной амплитудой  $H_z$  на подводящих проводах. В линиях передач под  $H_z$  э. понимаем интеграл (1) вдоль контура, соединяющего провода линии и лежащего в нормальном к линии сечении.

Измеряется  $H_z$  с помощью вольтметра — гальванометра с большим дополнит. сопротивлением  $R_0$ ; в идеале  $R_0 \rightarrow \infty$  (электроскоп). Вольтметр изме-

ряет падение  $H_z$  на самом себе —  $U_B$  (или при  $R_B \rightarrow \infty$  — разность потенциалов на своих клеммах). Чаще всего  $U_B$  близко к разности потенциалов между точками подключения вольтметра к цепи, но не всегда. На рис., а изображён трансформатор, по первичной обмотке к-рого течёт линейно растущий во времени ток  $I$ . Вторичной обмоткой является виток с длиной  $l$ , сопротивлением  $R$ , по к-рому течёт пост. ток  $I$ . Вольтметр, подключённый к точкам 1, 2 витка (рис., б), покажет падение  $H_z = U_B = RI_{12}/l$ , к-рое не равно ни эдс индукции  $\mathcal{E}_{12} = R I \theta / 2l$ , ни разности потенциалов  $\Phi_1 - \Phi_2 = RI(I_{12} l / - \theta / 2\pi)$ . В сомнительных случаях для сопоставления показаний вольтметра параметрам диагностируемой цепи обращаются к *Кирхгофа правилам*.

Лит.: Тамм И. Е., Основы теории электричества, 10 изд., М., 1989. М. А. Миллер, Г. В. Пермитин.

### НАПРЯЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИЕ ГЛАВНЫЕ — см. Напряжённость механической.

**НАПРЯЖЁННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ** — аксиальный вектор  $\mathbf{H}(r, t)$ , определяющий [наряду с вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}(r, t)$ ] свойства макроскопич. магн. поля. В случае вакуума двухвекторное описание магн. поля является чисто формальным, поэтому в гауссовой системе единиц в вакууме  $\mathbf{B} = \mathbf{H}$ , хотя, в силу традиций, и измеряются в единицах с разным наименованием:  $\mathbf{B}$  — в гауссах (Гс), а  $\mathbf{H}$  — в эрстедах (Э). В СИ сохраняются различие и для вакуума:  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ , где  $\mu_0$  — *магнитная постоянная*. Измеряется  $H$  м. п. в СИ в амперах на метр (А/м), 1 А/м =  $\approx 4\pi \cdot 10^{-3}$  Э. В соответствии с первым *Максвелла уравнением* источниками  $H$  м. п. являются электр. токи (проводимости, смещения и т. п.):

$$[\nabla \mathbf{H}] = \frac{4\pi}{c} (j + j_{cm}) = \frac{4\pi}{c} j + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $j$ ,  $j_{cm}$  — плотность тока, переносимого зарядами, и плотность тока смещения,  $\mathbf{D}$  — вектор *электрической индукции* (здесь и далее применяется гауссова система единиц). В среде могут также присутствовать токи намагничивания с плотностью  $j_m$ , связанные с индуцированной и (или) спонтанной *намагниченностью*  $\mathbf{M}$ ;  $j_m = c[\nabla \mathbf{M}]$ . Эти токи и обуславливают различие векторов  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi \mathbf{M}. \quad (2)$$

В этом отношении существует принципиальная разница между пост. и переменными во времени полями. В пост. полях ур-ние (2) (к-рое иногда наз. *материальным ур-нием* или *ур-нием среды*) автономно, в перем. полях оно зависит от вида материальной связи между электр. векторами:  $\mathbf{D} = \mathbf{D}(\mathbf{E}) = \mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P}^e$  — *напряжённость электрического поля*,  $\mathbf{P}^e$  — вектор электрической поляризации), потому что вихревая составляющая плотности перем. тока  $j$  может быть с известным произволом интерпретирована и как плотность тока поляризации  $j_p = \partial \mathbf{P}^e / \partial t$ , и как плотность тока намагничивания  $j_m$ . В общем случае:

$$j = c[\nabla \mathbf{M}] + \frac{\partial \mathbf{P}^e}{\partial t}. \quad (3)$$

Поэтому определение  $H$  м. п. в случае перем. полей условно и зависит от принятых материальных связей. В ВЧ-электродинамике иногда вообще не различают векторов  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{H}$ , относя все токи к токам поляризации.

Принципиальным является вопрос о том, какой из векторов,  $\mathbf{B}$  или  $\mathbf{H}$ , берётся в качестве «первичного». Историч. традиция выбрала в качестве такового вектор  $\mathbf{H}$ , с чем и связано его название —  $H$  м. п. Поэтому ур-ние (2) трактовалось как зависимость вектора  $\mathbf{B}$  от «первичного» поля  $\mathbf{H}$ :  $\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi \mathbf{M} = \mu \mathbf{H}$  ( $\mu$  — *магнитная проницаемость*). Однако впоследствии оказалось, что истинно первичным целесообразнее считать вектор магн. индукции  $\mathbf{B}$ , совпадающий с усреднё-

вой по физически малому объёму напряжённости микроскопич. магн. поля в вакууме (см. *Лоренца — Максвелла уравнения*).

Лит.: Там м. И. В., Основы теории электричества, 10 изд., М., 1989; Л и а и д а Д. Д., Л и а ф ш ц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982.

М. А. Миллер, Г. В. Пермитин.

**НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ в классической электродинамике**

( $E$ ) — векторная характеристика электрич. поля, сила, действующая на покоящийся в данной системе отсчёта единичный заряд. При этом предполагается, что внесение заряда (заряженного пробного тела) во внеш. поле  $E$  не изменяет такового. Иногда вместо Н. э. п. говорят просто «электрич. поле». Размерность Н. э. п. в гауссовой системе —  $L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$ , в СИ —  $VT^{-1}$ ; единиц Н. э. п. в СИ является вольт на метр (1 СГСЭ =  $3 \cdot 10^4$  В/м). Распределение Н. э. п. в пространстве обычно характеризуют с помощью семейства линий  $E$  (силовых линий электрич. поля), касательные к к-рым в каждой точке совпадают с направлениями вектора  $E$ . Как и любое векторное поле, поле  $E$  разбивается на две составляющие: потенциальную ( $[\nabla E_{\parallel}] = 0, E_{\parallel} = -\nabla\psi$ ) и вихревую ( $\nabla E_{\perp} = 0, E_{\perp} = [\nabla A_{\parallel}]$ ). В частности, электрич. поле, создаваемое системой неподвижных зарядов, является чисто потенциальным. Электрич. поле излучения, в т. ч. поле  $E$  в поперечных эл.-магн. волнах, является чисто вихревым. Вместе с вектором магн. индукции  $B$  Н. э. п. составляет единый 4-тензор электромагнитного поля. Поэтому чисто электрич. поле давшей системы зарядов существует лишь в «избранной» системе отсчёта, где заряды неподвижны. В др. инерциальных системах отсчёта, перемещающихся относительно «избранной» с пост. скоростью  $v$ , возникает ещё и магнитное поле  $B' = [vE]/\sqrt{1-v^2/c^2}$ , обусловленное появлением конвект. ток.  $j = \rho v/\sqrt{1-v^2/c^2}$  ( $\rho$  — плотность заряда в «избранной» системе).

Для характеристики полей в материальных средах помимо Н. э. п. вводит ещё вектор поляризации среды  $P$  ( $E$ ), равный *випольному моменту* единицы объёма. Обычно оба эти вектора объединяются в вектор *электрической индукции*, или электрич. смещения,  $D = E + 4\pi P$ . Источниками поля  $D$  являются свободные заряды ( $\nabla D = 4\pi\rho$ ), источниками поля  $E$  — совокупность свободных ( $\rho$ ) и связанных ( $\rho_{св}$ ) зарядов  $\nabla E = 4\pi(\rho + \rho_{св}) = -\nabla P$ . В линейных средах, где  $P$  есть линейная ф-ция  $E$ , имеет место принцип суперпозиции, согласно к-рому поле, создаваемое суммой зарядов  $P_{\Sigma} = \sum P_n$ , равно векторной сумме полей, создаваемых парциальными зарядами  $E_{\Sigma} = \sum E_n$ .

В класич. электродинамике иногда вводят «естеств.» значение Н. э. п.,  $E_{\text{нл}}^* = m_0^2 c^4 / |e|^2 = 6 \cdot 10^{18}$  СГСЭ, выражаемое через фундам. константы и равное приблизительно Н. э. п. на поверхности заряд. тела, служащего класич. моделью электрона (заряд  $e = -4,8 \cdot 10^{-10}$  СГСЭ, радиус  $r_e = 2,8 \cdot 10^{-13}$  см). Однако в таких сильных полях становятся существенными квантовые эффекты; в квантовой электродинамике критич. значение Н. э. п. для частицы с массой  $m$  и зарядом  $e$  равно  $E_{\text{кв}}^* = m^2 c^3 / |h|e|$ . Работа по перемещению частицы в таком поле на расстояние комптоновской длины волны  $\lambda = h/mc$  равна энергии покоя частицы. Для электрона  $E_{\text{кв}}^* = 4,4 \cdot 10^{13}$  СГСЭ; при  $E > E_{\text{кв}}^*$  происходит эфф. рождение электронно-позитронных пар (см. *Рождение пар*). Отношение  $E_{\text{кв}}^* / |E_{\text{нл}}^*| = 1/137$ , т. е. равно постоянной тонкой структуры.

Для прецизионных измерений статич. и медленн. изменяющихся электрич. полей обычно используют *Штарк эффект*. Последние рабочие измерения часто производят опосредованно, через значение

прикладываемых напряжений или через величины наведённых эдс на зондах и шупах.

Лит.: см. при ст. *Электрическое поле*.

**НАРУШЕНИЕ ПОЛНОЕ ВЪНТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ (НПВО)** — явление, основанное на проникновении световой волны из оптически более плотной среды 1 (с показателем преломления  $n_1$ ) в менее плотную среду 2 (с показателем преломления  $n_2$ ) на глубину порядка длины световой волны  $\lambda$  в условиях полного внутреннего отражения (ПВО), т. е. при падении света на границу раздела сред под углом  $\theta$ , большим критического  $\theta_{\text{кр}} = \arcsin n_2/n_1$  ( $n_2 < n_1/n_2$ ). Нарушение ПВО заключается в том, что коэф. отражения  $R$  становится меньше единицы вследствие поглощения света в слое, в к-рый проникает волна, падающая на отражающую среду. Величина ослабления  $A = 1 - R$  отражённой волны зависит от поляризации падающей волны, а также пропорциональна показателю поглощения  $\chi_2$  второй среды. Это послужило основой для развития спектроскопии НПВО, имеющей ряд преимуществ перед традиц. методами исследования спектров поглощения и отражения. Особенно эффективен метод НПВО для исследований поверхностных оптич. свойств объектов, а также для сильно поглощающих сред.

В отражающем слое амплитуда падающей волны  $E_0$  ослабляется в результате резонансного взаимодействия с молекулами вещества (диполями). В поглощающей среде 2 образуется затухающая волна  $E = E_0 \times \exp(-z/d_{\text{гн}})$ , где  $d_{\text{гн}}$  — глубина проникновения, на к-рой амплитуда волны ослабляется в  $e$  раз;  $d_{\text{гн}} = (\lambda/n_2)2\pi(\sin^2\theta - n_2^2/n_1^2)^{-1/2}$ . Затухающая волна имеет три составляющие в ортогональной системе координат  $xzy$  (в отличие от проходящей волны, у к-рой поле  $E$  ортогонально к направлению распространения и не имеет продольной составляющей). Амплитуды отражённых  $E_p$  и  $E_s$  волн, поляризованных соответственно в плоскости отражения и перпендикулярно ей, определяются вблизи границы ( $z = 0$ ) через составляющие  $E_{0x}, E_{0y}$  и  $E_{0z}$  падающей волны:  $E_p = E_{0y}, E_s = (E_{0x} + E_{0z})^{1/2}$ . Составляющие  $E_{0x}, E_{0y}$  и  $E_{0z}$  являются ф-циями  $n_2$  и  $\theta$ ; их зависимость от  $\theta$  представлена на рис. 1. Для единичной падающей амплитуды вблизи  $\theta_{\text{кр}}$  компонента  $E_{0y} = 2$ , компонента  $E_{0z}$  в среде 1 уменьшается в  $(n_2/n_1)^2$  раз, а в среде 2  $E_{0z}$  возрастает в  $2n_1/n_2$  раз, т. е. наиб. интенсивное эл.-магн. поле в отражающей среде можно получить с материалами, имеющими большие  $n_1$ , поэтому в спектроскопии НПВО используются материалы с большими  $n_1$ . Наиб. ослабление падающего света (при углах, близких к критическому) происходит за счёт диполей, ориентированных по оси  $z$ , т. е. пер-

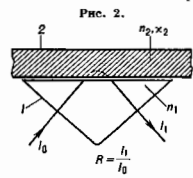
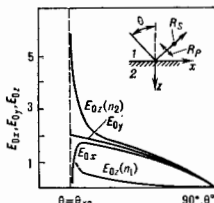


Рис. 1. Зависимость амплитуд электрического поля падающей волны от угла падения  $\theta$ .

пендикулярных границе раздела, а наименьшее — для диполей, расположенных по оси  $z$ .

Схема измерения оптич. постоянных  $n_2$  и  $\chi_2$ , получаемых из спектров НПВО с помощью *Кронига соотношения* и *Френеля формул*, приведена на рис. 2 ( $I_0$  — интенсивность падающей,  $I$  — интенсивность отражённой волн). Для выполнения условий ПВО исследуемое вещество приводится в идеальный контакт с оптич. элементом (обычно — призмой), про-

равным в выбранном диапазоне частот, с большим показателем преломления  $n_1$  (кристаллы — корунд, флюит, германий и др., опитч. керамика, халькогенидные стекла и т. п.). Нужный контакт легко достигается при исследовании жидкостей. Твёрдые тела приводятся в *оптический контакт* с вспомогат. опитч. элементом, где в качестве среды с большим  $n_1$  используется специально выбранная жидкость. Труднее всего достичь опитч. контакта с исследуемым твёрдым телом в УФ- и видимой области спектра, где  $n_1$  мала, поэтому наиб. широко метод НПВО распространён в ИК-области. Для спец. задач физика твёрдого тела, связанных с обнаружением поверхностных колебаний кристаллич. решётки (*плазмоне, поляритоне*), такой азор, по величине порядка  $\lambda$ , подбирается специально. В рентг. диапазоне эл.-магн. волн вспомогат. опитч. элемент не требуется, поскольку все вещества в этой области спектра имеют  $n_2 < 1$  и условие  $n_2 < n_1$  выполняется на границе с воздухом. Для достижения идеального контакта используются также высокорефракляющие клеевые среды, позволяющие получать в ИК-области высококачеств. спектры НПВО от разнообразных объектов, не прибегая к спец. обработке поверхности образцов. Это даёт возможность применять метод НПВО для неразрушающего способа контроля вещества. Применение новых термопластичных опитч. сред обеспечивает опитч. контакт призмы с негладким и неслесным объектом произвольной формы и даже при наличии на исследуемой поверхности микрорезностей размером  $\sim \lambda$ .

Количественно величина ослабления светового потока при отражении от поглощающей среды учитывается при азоры  $n_2$  его комплексной величиной  $n_2 = n_2 - ik_2$ . Показатель поглощения  $k_2$  связан с натуральным показателем поглощения  $\alpha$ , определяемым традиц. фотометрич. методами (см. *Положение света*), соотношением  $\alpha = 4\pi k_2/\lambda$ . В аналитич. практике, когда показатель ослабления  $A = 1 - R \leq 0,1$ , с хорошей точностью выполняется приближение  $R = 1 - \alpha d_{эфф}$ , к-рое получается при разложении ф-л Френеля в ряд по  $\alpha$  и ограничении первым членом ряда. Параметр  $d_{эфф} = d_{гЛ} n_{гЛ} E_0^2 / 2 \cos \theta$  наз. эфф. толщиной поглощающего слоя. Величина  $d_{эфф}$  определяется как геом. толщина образца, при к-рой в методе НПВО достигается ослабление интенсивности отражённого света, равное по величине ослаблению света при пропускании. Зависимость  $d_{гЛ}$  и  $d_{эфф}$  от угла падения приведена на рис. 3.

На практике спектры НПВО обычно получают при угле  $\theta > 0^\circ$ . Особенно эффективны методы НПВО для интервала  $0,01 < k_2 < 1$ , тогда как при использовании метода поглощения в этом случае необходимы объекты микронной толщины. Ма-

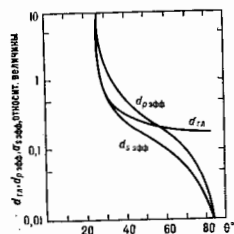


Рис. 3. Зависимость глубины проникновения  $d_{гЛ}$  и эффективной толщины  $d_{эфф}$  от угла падения света;  $n_{гЛ} = 0,4$ .

же  $k_2$  измеряются при  $\theta \approx \theta_{кр}$ , и используется возникшая при этом *поверхностная оптическая волна*, расширяющаяся вдоль поверхности исследуемого тела на сравнительно большое расстояние.

Для повышения контраста спектров НПВО часто применяется многократное ( $N$ -кратное) отражение, что пропорционально увеличению  $d_{эфф}$ ; при этом  $RN = 1 - \alpha N d_{эфф}$ . Спектры, полученные методом НПВО, качественно похожи на спектры поглощения, что

позволяет пользоваться при идентификации спектров НПВО атласами и каталогами спектров поглощения.

Из спектров НПВО на основе поляризац. измерений, комбинируя выражения для  $d_{эфф}$  и  $d_{эфф}$ , можно определять толщину плёнки. Для этого используется соотношение  $(1 - R_p)/(1 - R_s) = d_{эфф}^2/d_{эфф}^2$ , к-рое позволяет найти ход дисперсии  $n_2(\lambda)$ , далее методом Крамера — Кроинга рассчитывается  $k_2$ , а затем, исходя из коэф. отражения в максимуме спектральной полосы, определяется геом. толщина плёнки с точностью до  $0,1$  м.

Разл. модификации метода НПВО широко применяются для изучения поверхностных эл.-магн. волн, адсорбц. явлений, структуры тонких слоёв и т. п. Явление НПВО следует учитывать при передаче световых сигналов на большие расстояния с помощью световодов.

Лит.: Золотарёв В. М., Кисловский Л. Д., О возможности изучения спектров полюс в спектрометрии НПВО, *Оптика и спектроскопия*, 1965, т. 19, с. 808; Харири Н., Спектроскопия внутреннего отражения, пер. с англ., М., 1970; Золотарёв В. М., Лыгин В. И., Ларсен В. Е. Н., Спектры внутреннего отражения поверхностей соединений и адсорбированных молекул, *Успехи химии*, 1981, т. 50, с. 24. В. М. Золотарёв.

**НАСЕЛЁННОСТЬ УРОВНЯ** (заселённость уровня) — число частиц в единице объёма вещества, находящихся в определённом энергетич. состоянии (на данном энергетич. уровне). См. *Уровни энергии*.

**НАСЫЩЕНИЕ МАГНИТНОЕ** — см. *Магнитное насыщение*.

**НАСЫЩЕНИЯ ЭФФЕКТ** — выравнивание населённостей двух уровней энергии квантовой системы (молекулы, атома) под действием резонансного эл.-магн. излучения. При увеличении интенсивности падающего излучения возрастает вероятность индуциров. квантовых переходов с верх. уровня на нижий (вынужденное испускание) и обратно (поглощение), что приводит к выравниванию населённости этих уровней. Степень насыщения определяется соотношением скоростей индуциров. переходов и релаксац. процессов, ответственных за установление равновесного распределения населённости по уровням.

Если на среду, представляющую собой набор одинаковых *двууровневых систем* с собств. частотами  $\omega_{21}$ , падает монохроматич. эл.-магн. волна с частотой  $\omega$  и интенсивностью  $I$ , то разность населённости ниж. и верх. уровней  $\Delta N = N_1 - N_2$  описывается выражением

$$\Delta N = \Delta N_0 \left[ 1 + \frac{I}{I_0} \frac{\gamma^2}{(\omega - \omega_{21})^2} \right]^{-1}, \quad (*)$$

где  $\Delta N_0$  — разность населённости в отсутствие падающего излучения,  $I_0$  — однородная полуширина спектральной линии,  $\gamma$  — т. н. насащательная интенсивность. В точном резонансе ( $\omega = \omega_{21}$ ) при  $I = I_0$  разность населённости уменьшается вдвое:  $\Delta N = 0,5 \Delta N_0$ . При этом (при  $\omega \rightarrow \omega_{21}$ ) скорость индуциров. переходов намного превышает скорость релаксац. процессов, и населённость уровней выравнивается ( $\Delta N \rightarrow 0$ ).

Значение насащательной интенсивности  $I_0$  определяется типом перехода, его однородной шириной и временем релаксации населённости  $T_1$ . Для эл.-дипольных переходов  $I_0 = \frac{c^2 h^2}{8\pi^2 |d_{21}|^2 T_1}$  ( $d_{21}$  — матричный элемент дипольного момента) и может составлять величину от долей Вт/см<sup>2</sup> до сотен кВт/см<sup>2</sup> и более.

Н. э. играет важную роль при резонансном взаимодействии эл.-магн. излучения с веществом. Так, в поглощающих средах ( $\Delta N_0 > 0$ ) он приводит к уменьшению коэф. поглощения (см. *Простетления эффект*). При сильном насыщении ( $\Delta N \rightarrow 0$ ) поглощаемая веществом мощность перестаёт зависеть от интенсивности поля, т. е. переход насыщается. Аналогично, в усиливающей среде с инверсной населённостью  $\Delta N_0 < 0$  Н. э. вызывает уменьшение коэф. усиления. Наряду с этим уменьшается абс. величина резонансной добавки к показателю преломления, т. е. Н. э. обуславливает

зависимость показателя преломления от интенсивности падающего поля и, т. о., является одной из причин резонансного *самоограничения волн*.

Степень насыщения, как видно из (\*), убывает с увеличением отстройки частоты излучения от резонанса. Это приводит к деформации спектральных линий. В случае однородного уширения линия поглощения падающего излучения сохраняет лоренцовую форму, однако её ширина увеличивается в  $\sqrt{1 + I/I_n}$  раз. Этот эффект наз. *полезным уширением* или *уширением следствия насыщения*.

Н. з. играет определяющую роль в *квантовой электронике*. Он стабилизирует амплитуду колебаний в лазерах и *мазерах*, ограничивает сверху динамич. диапазон квантовых усилителей. В ряде случаев Н. з. применяется для стабилизации частоты генерации лазеров, для модуляции их добротности и т. д.

Н. з. широко используется в нелинейной спектроскопии, в частности он является физ. основой т. н. спектроскопии насыщения, позволяющей изучать с высоким разрешением структуру неоднородно уширенных спектральных линий и полос.

Н. з. может иметь место также и в случае многофотонных переходов между квантовыми уровнями. Для этого, однако, требуются существенно более высокие интенсивности падающего излучения (см. *Многофотонные процессы*).

Лит. см. при статьях *Джуринцева система*, *Квантовая электроника*, *Нелинейная спектроскопия*, *Лазер*. К. Н. Дробоч.

**НАСЫЩЕННЫЙ ПАР** — пар, находящийся в термодинамич. равновесии с конденсиров. фазой (жидкостью, твёрдым телом), реализуется при стационарном состоянии системы и отсутствует в ней р.з. составляющих градиента хим. потенциала. Н. п. существует в интервале темп-р и давлений между тройной точкой и критич. точкой, каждому значению давления в этом интервале соответствует своя темп-ра насыщения. Состояние сухого (не содержащего взвешенных частиц конденсиров. вещества) пара крайне неустойчиво, т. к. он легко конденсируется при малейшем повышении темп-ры или переходит в пересыщенный пар при её повышении. Если давление пара выше, чем давление Н. п. при той же темп-ре, то пар наз. *пересыщенный*.

Ю. Н. Любимов.

**НАСЫЩЕННЫЙ РАСТВОР** — раствор, находящийся в равновесии с растворимой фазой при данных условиях (темп-ре, давлении). Концентрация растворённого в Н. р. вещества наз. *растворимость* или *последнего* в данном растворителе при данных темп-ре и давлении. Если концентрация раствора ниже, чем концентрация Н. р. при той же темп-ре, раствор наз. *ненасыщенный*. При охлаждении Н. р. в присутствии центров кристаллизации растворённое вещество может кристаллизоваться, при их отсутствии раствор может стать *пересыщенным*. Ю. Н. Любимов.

**НАТРИЙ** (Natrium), Na, — хим. элемент гл. подгруппы I группы периодич. системы элементов, относится к *щелочным металлам*, ат. номер 11, ат. масса 22,98977. В природе представлен одним стабильным нуклидом  $^{23}\text{Na}$ . Электронная конфигурация внеш. оболочки  $3s^2$ . Энергии последоват. ионизаций соответственно равны 5,139; 47,304 и 71,65 эВ. Металлич. радиус 0,189 нм, радиус иона  $\text{Na}^+$  0,098 нм. Значение электроотрицательности 1,01.

Н. — мягкий серебристо-белый металл, быстро тускнеющий на воздухе. Обладает кубич. объёмно-центриров. решёткой с параметром  $a = 0,42820$  нм. Плотность 0,968 г/дм<sup>3</sup>,  $t_{пл} = 97,83^\circ\text{C}$ ,  $t_{кип} = 882,9^\circ\text{C}$ , теплота плавления 2,5998 кДж/моль, теплота испарения 106,0 кДж/моль (при  $t_{кип}$ ). Уд. теплоёмкость твёрдого Н. 1,23 кДж/(кг·К) (20°C), жидкого — 1,39 кДж/(кг·К) (при  $t_{кип}$ ). Коэф. теплопроводности 1,32·10<sup>8</sup> Вт/(м·К), коэф. теплового линейного расширения 7,21·10<sup>-6</sup> К<sup>-1</sup>. Уд. электрическое сопротивление

4,288·10<sup>-2</sup> мкОм·см (при 20°C), 9,675·10<sup>-2</sup> мкОм·см (при 100°C). Твёрдость по шкале Мооса 0,4, по Бригеллю 0,68 МПа. Вязкость жидкого Н. 0,690 мПа·с (при 97,83°C), 0,387 мПа·с (при 250°C), 0,278 мПа·с (при 400°C). Поверхностное натяжение 192 мН/м (при 97,83°C), 177 мН/м (при 400°C). Н. парамагнитен, уд. магн. восприимчивость 0,70·10<sup>-6</sup>.

Н. химически высокоактивен, степень окисления +1, бурно реагирует с водой, быстро окисляется на воздухе, хранит металл. Н. и обращаться с ним следует осторожно.

Н. используют как восстановитель редких металлов, как добавку к нек-рым сплавам. Жидкие Н. и калий используют в качестве теплоносителя (напр., в ядерных реакторах). Парам Н. наполняют газонагревательные трубки спец. ламп (жёлтое свечение). В качестве радиоактивных индикаторов применяют β<sup>-</sup>-радиоактивный  $^{23}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 2,602$  года) и более короткоживущий β<sup>-</sup>-радиоактивный  $^{24}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 15,0$  ч).

С. С. Вердников.

**НЕАДИАБАТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ** — переходы в квантовомеханич. системах под воздействием внешнего воздействия или во времени возмущений и случаях, когда характерное время изменения возмущения ( $\tau$ ) сравнимо или меньше обратных частот вызываемого перехода  $\omega_n \approx \hbar/\Delta E_n$ . Н. п. состоят в процессах перестройки электронных оболочек, происходящих в неупругих столкновениях атомов, ионов и молекул с заметной вероятностью. Для вычисления вероятности Н. п. в большинстве случаев используют полуклассич. приближение — квазиклассич. описание. Движение партнёров столкновения и квантовое описание их внутр. состояний. Волновую ф-цию всей системы  $\Psi(r, R)$  представляют в виде разложения по адабатам. базис (см. *Адиабатическое приближение*), т. е. по полному набору волновых ф-ций быстрого подсистемы  $\Phi_n(r, R)$  при фиксиров. параметрах  $\{R\}$  медленной подсистемы ( $R$  — совокупность координат быстрого подсистемы). Коэф. разложения в таком представлении — это адабаты, термы (уровни) медленной подсистемы  $\chi_n(R)$ . Проблема нахождения полной волновой ф-ции  $\Psi(r, R)$  сводится в общем случае к решению *Штурма* — *Лиувилля задачи* для бесконечной системы зацепляющихся обыкновенных дифференц. ур-ний. Связи между этими ур-ниями определяются недиагональными матричными элементами от оператора кинетич. энергии относит. движения медленной подсистемы. В тех случаях, когда ими можно пренебречь, быстрая сходимость адабатыч. приближения обеспечена. Чаще всего малость матричных элементов от операторов кинетич. энергии по сравнению с потенциалами ирредуцируется в электронно-ядерных системах (атомах, молекулах, кристаллах), где соответствующим параметром разложения является величина  $(m_e/M)^{1/2}$  ( $m_e$  — масса электрона,  $M$  — масса ядра), п адабатыч. приближение наз. *приближением Борна — Оппенгеймера* (М. Борн, В. Орренгеймер, 1927). Оно оказывается справедливым, если волновая ф-ция — медленно меняющаяся ф-ция ядерных координат, и нарушается при наличии вырожденных или почти вырожденных электронных состояний. Нестационарные электрон-ядерные системы сталкивающихся атомных частиц описываются теоретически как квазиклассич. Адиабатич. принцип разделения движений и полуклассич. метод описания взаимодействия между партнёрами столкновения являются предосновой описания эволюции всей системы на основе нестационарной теории возмущений. Гл. характеристикой неупругого перехода с дефектом энергии  $\Delta E$  при скорости относит. движения  $v$  служит параметр Мессии  $\xi = \Delta E \cdot a/\hbar v$ . Здесь  $a$  — размер области, где существенно меняется адабатыч. электронная волновая ф-ция. Критерием адабатычности столкновения является выполнение неравенства  $\xi \gg 1$ . Вероятность Н. п. между состояниями  $|k\rangle$  и  $|l\rangle$  с очень малым дефектом энергии  $\Delta E$  при  $\xi \gg 1$ , как правило, экспоненциаль-

по мала. В приближении Ландау — Дыхне (1961) [1, 2] она равна

$$W_{fi} = \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \text{Im} \int_{t_0}^t \Delta \mathcal{E}(t) dt \right\}.$$

Здесь  $t'$  — любая точка на веществе оси времени,  $t$  — точка в верхней полуплоскости комплексного времени  $t$ , в  $k$ -рассеянии  $\Delta \mathcal{E}(t) = 0$ . В случае степенной мажоранты (напр., в процессах кулоновской ионизации атомов медленными тяжёлыми частицами) вероятности Н. п. наделяются в первом приближении Борна — Фока (М. Born), устоявшегося в 1928:

$$W_{fi} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dt}{\Delta \mathcal{E}(t)} \langle j | \frac{\partial \hat{V}}{\partial t} | i \rangle \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} \int_{-\infty}^t \Delta \mathcal{E}(t') dt' \right\} \right|^2,$$

где  $\hat{V}(t)$  — оператор взаимодействия.

Квазирезонансные Н. п., т. е. переходы с относительно малыми дефектами энергии, происходят при расстояниях  $R_0$ , значительно превышающих типичные атомные размеры  $a_0$ , и характерных их сечения относительно велики:  $\sigma \sim R_0^2$ . Успешное развитие корректной асимптотич. теории квазирезонансных Н. п. обусловлено наличием малого параметра  $a_0/R_0$  и ограниченностью числа состояний квазиинварианта при больших межядерных расстояниях [3]. В отсутствие вырождения вероятностями переходов на др. уровни, кроме рассматриваемых двух (начального и конечного), при  $R_0 \gg a_0$  можно пренебречь, а адекватным оказывается приближение двух состояний. В предположении классичности движения системы в области неадиабатичности, в небольшом диапазоне изменения межкомнатных расстояний квазипересечения или пересечения термов (см. *Пересечение уровней*), неадиабатич. связь описывается моделью Ландау — Зинера — Штукельберга (С. М. Zener, E. С. G. Stueckelberg), установленной в 1932 [2—4]. Среди других, более общих, в т. ч. и величин, моделей неадиабатич. явлений, наиб. широко используется т. н. аксионная модель [3, 4], качественно верно описывающая случаи произвольной перестройки адиабатич. ф-ций при переходе через область неадиабатичности.

В явном отношении весьма важен обширный класс полуклассич. процессов столкновений с локальным нарушением адиабатич. критерия  $\xi \gg 1$ , происходящих в результате сближения или пересечения квазиинвариантных термов при нек-рых межкомнатных расстояниях. Для атомов средней массы — это столкновения в области от тепловых энергий до сотен эВ. В приближении пространств локализации матрица рассеяния находится путём шивания решений в областях неадиабатич. связи с решениями в областях адиабатич. эволюции [4]. Для построения многоканальной полуклассич. матрицы рассеяния в случае хорошо локализованных переходов чаще всего используются модели неадиабатич. связи двух состояний. В случае неск. каналов для расчета матрицы рассеяния в областях неадиабатич. связи используют разл. варианты теории возмущений: борновское приближение и его модификацию методом искажённых волн [5], метод почти адиабатич. возмущений Ландау — Дыхне или Борна — Фока [1, 2, 4], *энергич. возмущений метод* [4, 6] и др. В отсутствие пространств локализации Н. п. для построения многоканальной полуклассич. матрицы рассеяния решают системы многих ур-ний приходится, как правило, численно. Исключение составляют Н. п. между высоковольтными (почти классическими) состояниями в атомах, когда полуклассич. матрица рассеяния может быть найдена аналитически, исходя из *соответствия принципа* квантовой механики (предельного перехода  $\hbar \rightarrow 0$ ).

Квазирезонансные Н. п. играют определяющую роль в кинетике формирования компонентов плазмы, активной среды газовых лазеров, атмосферы и т. п. Экспериментально и теоретически исследуются также Н. п. в медленных атомных столкновениях, как резонансная и нерезонансная перестройка, передача возбуждения, дезактивация, деполаризация, силовый обмен, переходы между компонентами тонкой и сверхтонкой структуры электронных оболочек атомов, между разл. молекулярными состояниями, столкновения с участием отрицат. ионов и др. Цели исследований — получение детальной информации о механизмах и осн. особенностях элементарных процессов столкновений, а также надёжная оценка величины вероятностей и сечений разл. каналов возбуждения.

Лит.: 1) Дыхне А. М., Адиабатическое возмущение состояния дискретного спектра, «ЖЭТФ», 1961, т. 41, с. 1324; 2) Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Квантовая механика, 4 изд., М., 1989; 3) Гладкий В. М., Никитин И. Е. Е., Смирнов В. М., Теория столкновений атомных частиц, М., 1981; 4) Никитин И. Е., Уманский С. И., Неадиабатические переходы при медленных атомных столкновениях, М., 1979; 5) Мотт Н. М., Мессер Г., Теория атомных столкновений, пер. с англ., М., 1969; 6) Дыхне А. М., Юдин Г. Л., «Встряхивание» неавтономной системы и характер стимулированных их переходов, «УФН», 1978, т. 125, с. 377.

Г. Л. Юбин.

**НЕВЕСОМОСТЬ** — состояние, в  $k$ -рассеянии находится материальное тело, свободно движущееся в поле тяготения Земли (или любого др. небесного тела) под действием только сил тяготения. Отличит. особенность состояния Н. в том, что при Н. действующие на частицы тела внеш. силы (силы тяготения) не вызывают взаимных давлений частей тела друг на друга.

Когда тело покоится в поле тяготения Земли на горизонтальной плоскости, на него действуют сила тяжести и численно равная ей, но противоположно направленная сила — реакция плоскости. В результате в теле возникают внутр. усилия в виде взаимных давлений частей тела друг на друга. Человеческий организм воспринимает такие внутр. усилия как привычные для него состояние весомости. Появляются эти внутр. усилия за счёт действия реакции плоскости. Реакция является силой поверхностной, т. е. силой, непосредственно действующей на какую-то часть поверхности тела; другим же частям тела действие этой силы передаётся путём давления на них соседних частей, что и вызывает в теле соответствующие внутр. усилия. Аналогичные внутр. усилия возникают при действии на тело любых др. поверхностных сил: силы тяги, силы сопротивления среды и т. п. Если поверхностная сила численно больше силы тяжести, то соответственно больше и внутр. усилия, что вызывает явление перегрузки и имеет, напр., место при старте ракеты.

Сила тяготения является силой массовой и, в отличие от поверхностных сил, действует непосредственно на каждую из частей тела. Поэтому, когда на тело действует только сила тяготения, оно непосредственно сообщают каждой из частей тела одню и ту же ускорение и эти частицы движутся как свободные, не оказывая взаимных давлений друг на друга; тело находится в состоянии Н.

Вообще состояние Н. имеет место, когда: а) действующее на тело внеш. силы являются только массовыми (силы тяготения); б) поле этих массовых сил локально однородно, т. е. силы поля сообщают всем частям тела в каждом его положении одинаковые по модулю и направлению ускорения, что при движении в поле тяготения Земли практически имеет место, если размеры тела малы по сравнению с радиусом Земли; в) нач. скорости всех частей тела по модулю и направлению одинаковы (тело движется поступательно).

Напр., космич. летат. аппарат (или ИСЗ) и все находящиеся в нём тела, получив соответствующую нач. скорость, движутся под действием сил тяготения вдоль своих орбит практически с одинаковыми ускорениями, как свободные, и ни сами тела, ни их частицы взаимных давлений друг на друга не оказывают, т. е. находятся

в состоянии Н. При этом по отношению к кабине летат. аппарата находящегося в нём тело может в любом месте оставаться в покое (свободно «висеть» в пространстве). Хотя силы тяготения при Н. действуют на все частицы тела, но нет внеш. поверхностных сил, к-рые могли бы вызывать взаимные давления частиц друг на друга. Отметим, что внутр. усилия другой природы, вызываемые во внеш. воздействиями, напр. молекулярные силы, температурные расширения, мускульные усилия в теле человека, могут иметь место и в состоянии Н.

Н. может существенно влиять на ряд физ. явлений. Напр., у жидкостей, налитой в сосуд, силы межмолекулярного взаимодействия, малые в «земных» условиях по сравнению с силами давления, обусловленными весомостью, влияют только на форму мениска. При Н. действие этих сил приводит к тому, что смачивающая жидкость, помещённая в закрытый сосуд, равномерно распределяется по стенкам сосуда, а воздух, если он есть, занимает среднюю часть сосуда, несмачивающая же жидкость принимает в сосуде форму шара. Капли вылившейся из сосуда жидкости тоже стягиваются в шарики.

Вследствие значит. отличия условий Н. от «земных» условий, в к-рых создаются и отлаживаются приборы и агрегаты ИСЗ, космич. летат. аппаратов и их ракет-носителей, проблема Н. занимает важное место среди др. проблем космонавтики. Так, в условиях Н. авиационные приборы и устройства, в к-рых используются физ. маятники или свободная подача жидкости и т. п. Учёт Н. становится особенно существенным для систем, имеющих ёмкости, частично заполненные жидкостью, что, напр., имеет место в двигателях, установках с жидкостно-реактивными двигателями, рассчитанных на многократное включение при космич. полёте. Возникает и ряд др. техн. проблем.

Особенно важно учитывать своеобразие условий Н. при полёте обитаемых космич. кораблей, т. к. условия жизни человека при Н. существенно отличаются от привычных «земных» условий, что вызывает изменения ряда его жизненных функций. Однако предарит, тренировки и профилактические меры позволяют человеку долгое время пребывать и успешно работать в условиях Н.

Предполагается также, что при очень длин. полётах на орбитальных (околоземных) или межпланетных станциях можно создавать искусств. «тяжесть», располагая, напр., рабочие помещения в кабинах, вращающихся вокруг центр. части станции. Тела в этих кабинах будут прижиматься к боковой поверхности кабины, к-рая будет играть роль «пола», а реакция этого «пола», приложенная к телам, и создаст искусств. «тяжесть».

С. М. Гер.

**НЕВЗАИМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** оптические — устройства, для к-рых условия прохождения света и прямой и обратном направлениях неодинаковы. Оптич. Н. э. используются в системах управления оптич. излучением для создания однопользовательных оптич. схем, для возбуждения в кольцевых лазерах заданного направления бегущей волны, в лазерах заданной частоты для устранения захвата частот встречных волн (см. *Захватывание частот*), а также в волоконно-оптических гироскопах для задания нач. сдвига фаз между встречными волнами.

Обязат. условием для создания оптич. Н. э. является использование такого физ. эффекта, в к-ром имеется выбранное направление, совпадающее с одним из направлений распространения света. Напр., для *Фарадея эффекта* и *Веземана эффекта* выбранным является направление внеш. магн. поля, в движущихся и вращающихся средах — направление движения или вращения, в акустич. устройствах — направление распространения звука. Независимость эффектов может быть по фазе, амплитуде, поляризации.

**Фазовые оптич. Н. э.** Для фазовых Н. э. используются среды, в к-рых различна скорость распространения

света для прямой и обратной волн. Это приводит к различию оптических длин фазовых оптич. Н. э. для световых волн с противоположными направлениями распространения. Примером фазового Н. э. является движущаяся среда (см. *Физо опыт, Скорость света*). Для среды с показателем преломления  $n$ , движущейся со скоростью  $v$ , фазовые скорости волн, распространяющихся вдоль и против движения среды, равны  $u = c/n \pm v(1 - 1/n^2)$ . Недостатком оптич. Н. э., использующих эффекты «увлечения» света движущейся средой, является требование высокой стабильности скорости движения. Поэтому практически чаще используется независимость фарадеевской ячейки, в к-рой скорость световой волны с заданной круговой поляризацией зависит от угла между направлением распространения света и внеш. магн. полем. Разности фаз волн, поляризованных по левому и правому кругу, при прохождении фарадеевской ячейки длиной  $l$  в прямом и обратном направлениях равны

$$\delta_{\pm} = \pm 2\lambda g \cos\theta / \lambda_0 n_0,$$

где  $\lambda$  — длина волны света,  $n_0$  — показатель преломления среды в отсутствие внеш. магн. поля,  $g$  — псевдотензор гирации,  $\theta$  — угол между направлением световой волны и направлением магн. поля. В диамагн. и парамагн. веществах величина вращения пропорциональна магн. полю, а в ферромагнетиках — намагниченности среды.

Фазовые Н. э. в волоконно-оптич. гироскопах задают нач. разность фаз между встречными волнами света; в лазерных гироскопах они создают разность оптич. длин для волн, бегущих в противоположных направлениях. Если волну, поляризованную по левому кругу, подавать с помощью линейного поляризатора, расположенного между двумя пластинками  $\lambda/4$  (главные оси к-рых повернуты на  $+45^\circ$  и  $-45^\circ$  относительно направления макс. пропускания поляризатора), то для встречных волн, поляризованных по правому кругу, частоты генерации кольцевого лазера окажутся различными, т. к. частота генерации определяется тем, что на длине лазера должно укладываться целое число длин волн излучения.

**Амплитудные оптич. Н. э.** обычно используются либо для коммутации направления излучения, либо для подавления рассеянного назад излучения с целью получения высокостабильного одночастотного лазерного источника. Применяются они и для подавления одной из двух встречных волн в кольцевом лазере. Амплитудный Н. э. для подавления одной из волн представляет собой (рис. 1) фарадеевский элемент  $Z$  длиной  $l$ , расположен-

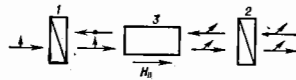


Рис. 1. Независимый фарадеевский элемент: 1, 2 — поляризаторы, повернутые друг относительно друга на  $45^\circ$ ; 3 — фарадеевская ячейка.

ный между двумя поляризаторами 1 и 2, повернутыми друг относительно друга на  $45^\circ$ . При прохождении линейно поляризованного света через фарадеевский элемент происходит поворот плоскости поляризации на угол  $\psi = \pi g l / \lambda_0 n_0 = V H l$  за счёт разности скоростей волн, поляризованных по правому и левому кругу. Здесь  $V$  — постоянная Верле, зависящая от частоты света и темп-ры,  $H$  — напряжённость продольного магн. поля. Угол поворота не зависит от направления распространения света. Если плоскость поляризации света, идущего вдоль  $H$ , поворачивается на  $45^\circ$ , то свет полностью пройдёт через поляризатор 2 (нижние стрелки, рис. 1); свет с противоположным направлением (верхние стрелки) после поворота плоскости его поляризации на  $45^\circ$  полностью поглотится поляризатором 1.

Другой вид амплитудного оптич. Н. э. (рис. 2) представляет собой систему из двух электрооптич. СВЧ-модуляторов света 1 и 2, помещённых между скрещённых поляризаторов 3 и 4. Если с помощью фазовращателя 5 сдвинуть фазу напряжения в модуляторе 2 на  $\pi/2$  относительно 1, а расстояние между модуляторами  $L$  взять равным  $\lambda/4$  ( $\lambda$  — длина волны модулирующего сигнала), то свет, идущий слева, через эту систему не пройдёт, т. к. к моменту прихода света во второй модулятор напряжение на нём сдвинется на  $\pi$

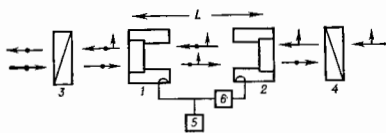


Рис. 2. Независимый электрооптический элемент: 1, 2 — СВЧ-модуляторы света; 3, 4 — скрещённые поляризаторы; 5 — генератор СВЧ; 6 — фазовращатель.

относительно напряжения, модулированного светом в 1. Поэтому свет, выходящий из модулятора 2, не будет иметь компоненты, поляризованные ортогонально исходному свету. Для идущего справа света, разность фаз между модулирующими сигналами на первом и втором модуляторах равна нулю и модулиров. свет проходит через скрещённые поляризаторы. Если необходимо подавать свет, идущий справа, то надо фазовращателем 6 установить фазу —  $\pi/2$ .

Амплитудная независимость существует также при распространении света в поле акустич. волны. Это явление связано с тем, что при дифракции Брэгга для встречных световых пучков на бегущей акустич. волне условия Брэгга выполняются при разл. углах падения света. Световой пучок, идущий справа (рис. 3), дифрагирует на +1 максимум, а свет, идущий слева, — на -1 максимум. Если условие синхронизма точно выполнено для +1 максимума, то для -1 оно нарушено. Степень нарушения определяется вели-

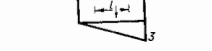


Рис. 3. Независимый акустооптический элемент: 1 — возбуждатель звука; 2 — звукопровода; 3 — поглотитель звука.

чиной  $\eta$ ,  $k$ -ран в данном случае равна  $v\lambda/c\lambda$ , где  $c$  — скорость света,  $l$  — длина области взаимодействия света и звука. Если интенсивность звука такова, что на +1 максимум дифрагирует весь свет, то при  $\eta l = \pi/\sqrt{3}$  свет в -1 максимум не пройдёт. Т. о., свет, падающий на ячейку слева, проходит через неё без потерь, а свет, идущий справа, весь отклоняется в +1 максимум.

Разность частот, интенсивностей и поляризаций встречных волн в кольцевом лазере создаётся также с помощью магнитооптических эффектов Керра, возникающих при отражении от ферромагн. зеркала резонатора. Эти эффекты проявляются в зависимости характеристик отражённого света от вектора намагниченности ферромагнетика  $J$  и от направления распространения и поляризации падающего света. В случае меридионального и полярного эффектов Керра ( $J$  в плоскости падения) происходит изменение поляризации падающего линейно поляризованного излучения. При экваториальном эффекте Керра ( $J$  перпендикулярен плоскости падения) интенсивность отражённого излучения зависит от  $|J|$ . Разность частот линейно поляризованных встречных волн (с поляриза-

цией в плоскости падения) создаётся за счёт экваториального эффекта, встречных волн с круговой поляризацией — за счёт полярного эффекта.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Зильберман Г. Е., Кулеченко Л. Ф., Независимый эффект при прохождении света через ультразвуковой пучок, «Радиотехника и электроника», 1979, т. 24, № 5, с. 301; Балацкий В. И., Шарыгин В. Н., Чирков Л. Е., Физические основы акустооптики, М., 1985. В. Н. Пармил, А. Н. Шелев.

**НЕГОЛОНОМНАЯ СИСТЕМА** — механич. система, на к-рую кроме геом. связей наложены ещё дифференциальные (кинематич.) связи, не сводящиеся к геометрическим и называемые неголономными (см. Голономная система). Математически неголономные связи выражаются ур-ниями вида:

$$f_k(x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, t) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, r), \quad (1)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  — координаты,  $\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i$  — проекции скоростей,  $t$  — время,  $r$  — число наложенных связей. При этом предполагается, что ур-ния (1) не могут быть непосредственно проинтегрированы; в противном случае получим голономную систему. Число координат  $x_i, y_i, z_i$  определяющих положение Н. с., больше числа степеней свободы системы. Т. к. ур-ния (1) непосредственно не интегрируются, для Н. с. в отличие от голономной, нельзя заранее выразить зависимость координаты через независимые.

Н. с. наз. линейной, если ур-ния (1) линейны относительно скоростей, т. е. имеют вид:

$$\dot{f}_k = \sum_{i=1}^n (a_{ki} \dot{x}_i + b_{ki} \dot{y}_i + c_{ki} \dot{z}_i) + d_k = 0, \quad (2)$$

где  $a, b, c$  и  $d$  — ф-ции  $x_i, y_i, z_i$  и  $t$ ;  $N$  — число точек системы.

Пример линейной Н. с. — шар, катящийся по шероховатой плоскости. Ур-ние связи, выражающее тот факт, что точка касания шара имеет скорость, равную нулю, не может быть проинтегрировано. Возможные перемещения точки системы при связях (2) удовлетворяют условиям:

$$\sum_{i=1}^n (a_{ki} \delta x_i + b_{ki} \delta y_i + c_{ki} \delta z_i) = 0. \quad (3)$$

Движение линейных Н. с. можно изучать с помощью Чалыгина уравнений, Аппеля уравнений и др. С учётом условий (3) эти ур-ния могут быть получены из дифференциальных принципов (Д'Аламбера — Лагранжа принцип и Гаусса принцип) или же из обобщённого интегрального принципа Гамильтона — Остроградского.

Н. с. наз. нелинейной, если ур-ния (1) нелинейны относительно скоростей. Пример: система двух точек  $M(x, y, z)$  и  $M_1(x_1, y_1, z_1)$ , в  $k$ -ой точке  $M_1$  движется по заданному закону, а скорость точки  $M$  зависит от взаимного расположения точек, напр. от расстояния  $MM_1$ . Ур-ние связи будет

$$f = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = 0.$$

Ур-ния движения нелинейных Н. с. могут быть получены из тех же принципов механики, что и для линейных Н. с., если возможные перемещения точек системы удовлетворяют условию Чапетава:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \delta x_i + \frac{\partial f_k}{\partial y_i} \delta y_i + \frac{\partial f_k}{\partial z_i} \delta z_i \right) = 0.$$

Механика Н. с. находит приложения при решении ряда задач совр. техники (автоматика, кибернетика и др.).

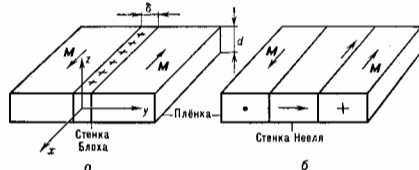
Лит.: Чапетава И. С. А., Исследования по динамике неголономных систем, М. — Л., 1949; Герц Г., Принципы меха-



нии, расположенные в ивовой связи, пер. с нем., М., 1959; Дюбронравов В. В., Основы механики негеликозных систем, М., 1970. Т. С. Логозов.

**НЕЕЛЯ СТЕНКА** — область между соседними доменами (см. *Магнитная доменная структура*) в тонких магнитных пленках, в к-рой быстро пространство. Изменение намагниченности  $M$  происходит в плоскости расположения векторов намагниченности доменов (в плоскости, параллельной поверхности пленки). Согласно определению, в Н. с., в отличие от *Блоха стенки*,  $\text{div} M \neq 0$ . Представление о доменных стенках (ДС) подобного типа впервые было введено Л. Неелем (L. Néel, 1955) [1].

Причину образования Н. с. удобно объяснить, используя рисунок. Если в тонкой пленке толщиной  $d$  при переходе от левого домена к правому (рис. а) намагниченность  $M$  вращается так, что остается парал-



лельной плоскости ДС (стенка Блоха, плоскость  $xz$ ), то в узкой полоске шириной  $\delta$  (толщина ДС) на поверхности пленки образуются магнитостатич. заряды, приводящие к увеличению полной энергии стенки [2]. Эта энергия при условии  $d < \delta$  может быть снижена, если поворот  $M$  будет осуществляться в плоскости пленки, как изображено на рис. б (стенка Нееля). С этим снижением полной энергии пленки и связана энергетич. выгода образования Н. с. в тонких пленках. По совр. оценкам, критич. толщина пленки  $d_{кр}$ , ниже к-рой выгодно образование Н. с. в тонких пленках, составляет сотни ангстрем.

Лит.: 1) Néel L., *Energie des parois de Bloch dans les couches minces*, с. 11, heb. Séanc. Acad. Sci., 1955, v. 241, p. 333; 2) Вонсовский С. В., *Магнетизм*, М., 1971.

**НЕЕЛЯ ТОЧКА** — темп-ра ( $T_N$ ) фазового перехода из парамагн. состояния в антиферромагнитное (см. *Антиферромагнетизм*). Названа в честь Л. Нееля (L. Néel), выдвинувшего (наряду с Ж. Д. Ландау) идею о существовании антиферромагн. упорядочивания атомных магн. моментов вещества. Большой частью этот переход бывает переходом второго рода (см. *Магнитный фазовый переход*). В Н. т. наблюдаются максимумы, коэф. теплового расширения и др. термодинамич. величин. *Магнитная восприимчивость*  $\chi$  выше  $T_N$  изменяется согласно *Кюри — Вейса закону*  $\chi = C/(T + \theta)$ , где константа Вейса  $\theta$  обычно существенно (иногда в 2—3 раза) больше  $T_N$ . Ниже  $T_N$  у одноосных антиферромагнетиков наблюдается сильная анизотропия магн. восприимчивости. В отличие от *Кюри точки ферромагнетиков*, Н. т. не является изолиров. точкой на фазовой плоскости  $H - T$ . Она зависит от внеш. поля  $H$  и, как правило, понижается при увеличении поля  $H$ , стремясь к нулю, когда  $H \rightarrow H_E$  ( $H_E$  — эффективное магн. поле обменного взаимодействия). В исследованных антиферромагнетиках  $T_N$  меняется в широких пределах: от нанокельвинов для итерных антиферромагнетиков (напр., для ядерной спиновой системы меди  $T_N = 30 \text{ мК}$ ) до сотен кельвинов в металлах (Cr, Mn), простых оксидах (типа NiO) и ортоферритах. Макс. значение  $T_N = 950 \text{ К}$  наблюдается у гематита ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ).

**НЕИДЕАЛЬНАЯ ПЛАЗМА** — плазма, в к-рой потенциальная энергия взаимодействия между частица-

ми сопоставима с их кинетич. энергией или превышает её. Н. п. может приобретать качественно новые свойства по сравнению с идеальной. Напр., при сильном сжатии слабоионизирующей плазмы паров металлов её электропроводность возрастает до значений, сопоставимых с электропроводностью жидких металлов.

**Основные параметры неидеальности.** Плазма, заряд. частицы к-рой взаимодействуют по закону Кулона, становится неидеальной, когда ср. энергия кулоновского взаимодействия  $e^2 n_e^{1/3}/kT$  сравнима с тепловой энергией  $kT$ , т. е.

$$\gamma = e^2 n_e^{1/3} / kT \gtrsim 1, \quad (*)$$

где  $T$  — темп-ра,  $n_e$  — ср. число электронов в единице объёма, т. е.  $n_e \sim 1/3 n_{sp}$ ,  $\gamma$  — т. н. плазменный параметр взаимодействия. Если ввести *дебаевский радиус экранирования*  $r_D \sim (kT/n_e e^2)^{1/2}$ , то условие (\*) можно записать в виде  $\mu = 1/n_e r_D^3 \gtrsim 1$ . Величина  $\mu$  наз. плазменным параметром идеальности (см. *Идеальная плазма*). Плазма идеальна, если  $\mu \ll 1$ . С уменьшением  $r_D$  число частиц в дебаевской сфере  $(4\pi/3)n_e r_D^3$  уменьшается и теряется представление о дебаевской экранировке. Можно считать, что тогда экранировка осуществляется на ср. расстояниях между частицами и параметры  $\mu$  и  $\gamma$  совпадают. Если ионы многократно заряжены, то параметр электронно-ионного взаимодействия  $\gamma = Ze^2 n_i^{1/3} / kT$  содержит заряд иона  $Ze$  и ср. межкнонные расстояния  $n_i^{-1/3}$ ,  $n_i$  — концентрация ионов.

Представления, характерные для кинетики газоразрядной идеальной плазмы, неприменимы для Н. п. Далекие столкновения между заряд. частицами в ней не преобладают — *кулоновский логарифм*  $L = \ln(n_e r_D^3 / Z^2 e^2)$  теряет свой смысл. Близкие взаимодействия (на расстояниях макс. сближения частиц  $Z^2 e^2 / kT$ ) оказываются венарными, поскольку длина

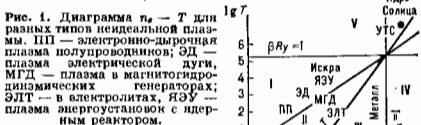


Рис. 1. Диаграмма  $\gamma_T$  —  $T$  для разных типов неидеальной плазмы. ИЗП — электронно-ионная плазма полупроводников; ЭД — плазма электрической дуги, МГД — плазма в магнитодинамических генераторах; ЭИТ — в электролитах, ЯЗУ — плазма энергоустановок с ядерным реактором.

пробег  $[n(Z^2 e^2 / kT)^2 n_i]^{-1}$  сравнима с расстоянием между частицами, что характерно для жидкостей.

Идеальная плазма возникает в результате тепловой ионизации разреженного газа (см. *Саха формула*). Плотное вещество может ионизоваться в результате смитти электронных оболочек атомов и ионов, если ср. расстояние между частицами меньше радиуса оболочки ( $r_{0p} \leq a_0 / Z$ ,  $a_0$  — радиус Бора). Для такой ионизации не требуются высокие темп-ры, кинетич. энергия характеризуется энергией Ферми  $\epsilon_F$ . В этом случае критерий неидеальности имеет вид:

$$\gamma_{кв} = Ze^2 n_e^{1/3} \epsilon_F^{-1} \gtrsim 1.$$

Такая плазма является вырожденной. Её неидеальность возникает и усиливается с уменьшением плотности, поскольку  $\epsilon_F = \hbar^2 (3/2 n_e)^{1/2} / 2m$ .

На диаграмме  $n_e - T$  (рис. 1) представлено неск. типов плазм: I — слабоидеальная плазма, в к-рой отнесены, напр., плазма газового разряда; II — классич. неидеальная плазма; III — неидеальная плазма

с вырожденными электронами и классич. ионами (здесь размещаются и жидкометаллич. состояния); IV — плазма, в к-рой вырожденные электроны взаимодействуют слабо, а классич. ионы — сильно (плазма, создаваемая при взрывном сжатии).

Квантовые эффекты могут играть важную роль и в невырожденной плазме. Если классич. расстояние макс. сближения  $Z^2e^2/kT$  меньше длины волны де Бройля  $\lambda_D$ , то представление о нём теряет смысл и в выражении кулоновского логарифма  $Z^2e^2/kT$  заменяется на  $\lambda_D$ :  $L = \ln(r_0/\lambda_D)$ . Из неравенства  $Z^2e^2/kT \ll \lambda_D$  можно получить неравенство  $Z^2R \ll kT$ , где  $R$  — энергия ионизации атома водорода (Ридберга постоянная). Последнее неравенство означает, что плазма полностью ионизована (рис. 1, область V).

В области I энергия связанного состояния превышает тепловую энергию свободных частиц, что означает присутствие в плазме атомов. Частично ионизованная плазма имеет в своём составе атомы, молекулы, свободные электроны и ионы. Параметры атомов разных веществ (размеры, поляризуемость, энергия ионизации) отличаются очень сильно. Если поляризуемость атомов  $\alpha$  велика ( $\chi \text{ Cs} \alpha = 400 \text{ \AA}^3$ ), то достаточно велик ср. потенциал  $\phi$ , создаваемый поляризов. атомами, так что

$$\gamma_{\text{ион}} = e\phi/kT = 2\pi\alpha e^2 n_0/kT r_0 > 1.$$

Следовательно, взаимодействие паров с атомами оказывается сильным и плазма является Н. п. (здесь  $r_0$  — размер атома,  $n_0$  — концентрация атомов). На диаграмме плотность — темп-ра (рис. 2) приведены разл. типы плазмы паров: члена в зависимости от темп-ры  $T$  и плотности  $n$  ( $n = n_0 + n_i$ ,  $n_i$  — концентрация ионов). Область сильного взаимодействия варж. частиц с нейтральными примыкает к двухфазной области (заштрихована). В результате притяжения варяд — нейтрал зарядовый состав может стать многокомпонентным, возникают молекулярные положит. и отрицат. ионы, а также более тяжёлые образования — кластерные ионы.

Область кулоновской идеальности ( $\mu \gg 1$ ), притягивая при низких темп-рах к конденсиров. состояниям, распространяется с ростом темп-ры в сторону высоких плотностей. Кривая  $\xi = 0,5$  условно отделяет частично ионизованную плазму от полностью ионизованной,  $\xi = n_e/(n_0 + n_e)$  — степень ионизации. Две ветви этой кривой соответствуют термической ионизации (нижняя) и ионизации сжатием (верхняя).

Н. п. в природе, технике и лабораторных условиях. Неидеальной является плазма в жидких металлах, полупроводниках, электролитах (ЗИТ, рис. 1), в глубинных слоях Солнца и планет-гигантов Солнечной системы, плазма белых карликов. Неидеальной является плазма рабочих тел в *магнетогидродинамических генераторах* на парах щелочных металлов (МГД), ракетных двигателях с газофазным ядерным реактором (ЯЭУ); плазма, возникающая в установках по исследованию термоядерного синтеза путём лазерного, электронного и взрывного обжатия мишени (см. *Лазерный термоядерный синтез, Инерциальное удержание*). Н. п. возникает за сильными ударными волнами при взрывах или при высокоскоростном ударе. В установках *плазменной технологии* неидеальная плазма возникает при импульсных электрических разрядах.

В лб. условиях слабоидеальная плазма образуется в электрич. разрядах в газе при высоких давлениях. Генерация сильноидеальной плазмы требует спец. методов. Нагрев исследуемого вещества в ампулах под высоким давлением в печах создаёт однородную плазму, к-рую можно надёжно диагностировать. Этот метод ограничен темп-рами до 3000 К из-за разрушения материальн. конструкции. Методы, использующие импульсные джоулев нагрев, позволяют достичь высоких темп-р, однако возникающая при этом плазма обычно неоднородна. Динамич. методы основаны на кумуляции энергии на фронте ударных волн или при адиабатич. сжатии. Динамич. методами были получены наиб. высокие концентрации энергии — давления в сотни тыс. атмосфер и темп-ры до  $10^8$  К. Трудность этих методов — в необходимости выскох временного разрешения диагностич. устройств.

Свойства Н. п. Энергия ионизации атома в плазме ниже энергии ионизации  $I$  уединённого атома. В сильноионизов. плазме это снижение  $\Delta I$  обусловлено дебаевским экранированием  $\Delta I = e^2/r_D$ . В слабоионизов. плазме  $\Delta I$  обусловлено поляризацией соседних атомов  $\Delta I = 2\pi\alpha e^2 n_0/r_0$ . Поскольку  $\Delta I$  пропорц. плотности атомов, у-рие Саха, определяющие степень ионизации  $\xi$  плазмы, записанное с учётом  $\Delta I$ , обнаруживает тенденцию экспоненциального роста  $\xi$ , а следовательно, и  $n_e$  при очень сильном увеличении плотности (сжатии),  $n_e \sim \exp[-(I - \Delta I)/2kT]$ . Сильные изменения  $n_e$  при изменении давления фиксируются при измерении коэф. электропроводности плазмы. Напр., на рис. 3 представлены зависимости электропроводности от паров Cs от темп-ры при разных давлениях. Штриховой линией показана на границе двухфазных состояний. При темп-рах, близких к критич. темп-ре конденсации  $T_c$ , электропроводность резко возрастает, приближаясь к электропроводности металлов, и в конечном счёте плазма металлизирована.

Электропроводность с ть слабоионизов. плазмы насыщенных паров металлов аномально велика по сравнению с электропроводностью идеальной плазмы. Это является следствием сдвига *ионизационного равновесия* в сторону увеличения концентрации электронов, обусловленного кластеризацией ионов. Ионные кластеры  $S_k^+$  ( $k \gg 1$  — число атомов в кластере) возникают и в результате сильного притяжения, притяжения атомов к иону. При высокой электропроводности сжимаемая плазма близка к сжимаемости газа, что позволяет разогнать и затормаживать потоки плазмы.

При высоких темп-рах плазма сильно ионизуется. Изабары  $\sigma$  (рис. 3) сближаются, как это происходит и в идеальной плазме, где  $\sigma \sim e^2 T^{3/2} n^{1/2} / L$ . Корректного выражения для  $\sigma$  в этой области теория сильно Н. п. не даёт.

Влияние слабой неидеальности на излучение плазмы в оптич. диапазоне проявляется в сдвиге и уширении спектральных линий и в смещении порогов фотоионизации на величину  $\Delta I$ . Линии, примыкающие к порогу, преобразуются в сплошной спектр. При очень высоких плотностях плазмы происходит перестройка её энергетич. спектра и оптич. иррадиация плазмы уменьшается. Это наблюдается, напр., в экспериментах с плазмой ртутью. По мере металлизации (возникающей при высоких плотностях при сжатии) уменьшается энергетич. щель  $(I - \Delta I)$ , переходы внутри к-рой

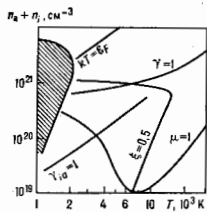


Рис. 2. Неидеальная плазма паров Cs при различных значениях температуры и плотности.

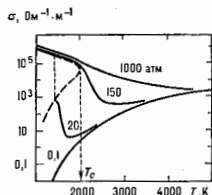


Рис. 3. Зависимость электропроводности неидеальной плазмы Cs от температуры при разных давлениях.

создают дискретный спектр. С уменьшением щели дискретный спектр замещается сплошным, в областях прежней прозрачности возникает широкая полоса поглощения.

Для Н. п. характерно чрезвычайное разнообразие термодинамич. состояний. Взаимодействие между заряж. частицами в плазме является преим. притягивающим, что при сжатии способствует потере устойчивости и приводит к известным фазовым переходам: переход металл — неметалл в металл-аммиачных растворах, катальный переход в электронно-дырочной плазме, переход пар — жидкость щелочных металлов в окрестности критич. точки.

Макс. давления, достигаемое в наст. время за сильными ударами волнами, составляют десятки млн. атмосфер. С ростом давления электронные оболочки атомов и ионов перестраиваются и поочерёдно разрушаются. Термодинамич. величины сверхлютой плазмы монотонно зависят от  $Z$  (см. *Термодинамика плазмы*).

Методы описания Н. п. Слабоидеальная плазма не может быть удоблена газу умеренной плотности. Кулоновское взаимодействие, характерное для неё, приводит к расходимости второго вирьяльного коэффициента и статусмы атома. При корректном учёте коллективных эффектов эти расходимости взаимно уничтожаются.

Для сильной Н. п. методы, использующие различие по малым параметрам, неприменимы. Лишь результаты экспериментов могут указывать на возможность экстраполяции асимптотич. разложений и служить основой альтернативных подходов.

Исследования вырожденной плазмы опираются на вариац. метод функционала плотности энергии (при высоких темп-рах — функционала плотности термодинамич. потенциала; см. *Фока метод функционалов*). Несмотря на то что обменная и коррелл. энергии записываются при  $T_{ep}/a_0 \approx 1$  весьма ненадёжно, этот метод позволяет описать даже сравнительно неоднородные жидкометаллич. состояния.

Успехи теории классич. плазмы связаны с проведением *перенормировки* взаимодействия, если она позволяет выделить новые квазичастицы (кластеры, квазиатомы и др.) и с использованием методов машинного эксперимента — *Монте-Карло метода* и *молекулярной динамики метода*.

Лит.: В е д е н о в А. А., Термодинамика плазмы, в сб.: Вопросы теории плазмы, под ред. М. А. Леонтовича, в. 1, М., 1963; К у д р и н Л. П., Статистическая физика плазмы, М., 1974; К р и ж и ц Д. А., Л о з о в и к Ю. Е., Ш п а т о в о в с к а я Г. В., Статистическая модель вещества, «УФН», 1975, т. 117, с. 3; К л и м о н т о в и ч Ю. Л., Кипетическая теория неидеальной газа и неидеальной плазмы, М., 1975; З а м а л и н В. М., Н о р м а н Г. Ф., Ф и л и н о в В. С., Метод Монте-Карло в статистической термодинамике, М., 1977; О б е л и н В., К р е ф т В., К р е м н Д., Теория связанных состояний и неинвариантного равновесия в плазме и твердом теле, пер. с англ. Х в а т а И. В. и И. В. И. Т. Электронны в плотных газах и плазме, М., 1981; Ф о р т о в В. Е., Я к у б о в И. Т., Физика неидеальной плазмы, Черноголова, 1984. И. Т. Якубов.

**НЕЙМАНА ЗАДАЧА** — задача о нахождении решения *Лапласа уравнения*  $\Delta u = 0$  или *Пуассона уравнения*  $\Delta u = -f$  в области  $G$  (внутр. Н. з.) или вне её (внеш. Н. з.), имеющего на границе  $S$  области  $G$  заданную непрерывную нормальную производную  $u_1$  (соответственно внутри и извне  $S$ ). При постановке внеш. Н. з. требуется, чтобы решение на бесконечности стремилось к нулю в трёхмерном и было ограниченным в двумерном случаях.

Н. з. для ур-ний Пуассона и Лапласа в плоскости подставной  $v(x) = u(x) - V(x)$ , где в трёхмерном случае  $V(x) = (4\pi)^{-1} \int f(y) |x - y|^{-1} dy$  — объёмный потенциал, а в двумерном  $V(x) = \int f(y) \ln |x - y| dy$  — логарифмич. потенциал; очевидным образом связаны и граничные значения  $u_1$  и  $v_1$ . Внеш. Н. з. связана с внутренней преобразованием Кельвина, т. е. переходом к новым координатам  $x \rightarrow x' = xR^2/x^2$  и новой ф-ции

$$u(x) \rightarrow u'(x') = (R/|x'|) u(R^2x'/x^2)$$

(в двумерном случае множитель  $R/|x'|$  перед  $u$  отсутствует). Координаты  $x$  и  $x'$  симметричны относительно сферы радиуса  $R$  с центром в начале координат.

Решение внутр. Н. з. существует, единственно с точностью до постоянной и непрерывно зависит от граничных условий для достаточно гладких границ  $S$  (в частности, для  $S$ , задаваемых в окрестности каждой своей точки  $x_0$  ур-нием  $\Phi_{x_0} = 0$  с условием, что  $\nabla \Phi_{x_0} \neq 0$ , а  $\Phi_{x_0}$  непрерывна вместе со своими производными). Необходимым условием разрешимости внутр. Н. з. (а также внеш. Н. з. в двумерном случае) является равенство

$$\int_{\partial G} u_1(x) dS + \int_G f(x) dx = 0.$$

Решение Н. з. для ур-ния Лапласа обычно представляется в виде потенциала простого слоя

$$u(x) = \int_S \mu(y) |x - y|^{-1} dS_y$$

(в двумерном случае вместо  $|x - y|^{-1}$  стоит  $-\ln |x - y|$ ) и сводится к решению *Фредгольма уравнения* для плотности  $\mu(x)$ :

$$\pm 2n^{-2} \mu(x) + \int_S \mu(y) \frac{\cos \varphi_{xy}}{|x - y|^{n-1}} dS_y = u_1(x), \quad n = 2, 3,$$

где «+» соответствует внутренней («-» — внешней Н. з.,  $\Phi_{xy}$  — угол между вектором  $x - y$  и нормалью к  $S$  в точке  $y$ ,  $dS_y$  — элемент поверхности в точке  $y$ ).

Н. з. часто встречается в электро- и магнитостатике, стационарных задачах гидродинамики, теплопроводности и т. д. Условие её разрешимости имеет физ. смысл закона сохранения: суммарный поток (напряжённости электрич. или магн. поля, весимаяемой жидкости, тепла и т. д.) через замкнутую поверхность  $S$  равна суммарной величине источников (заряда и т. п.).

Лит.: В а д и м и р о в В. С., Уравнения математической физики, изд. М., 1988; М и р а н д а К., Уравнения с частными производными эллиптического типа, пер. с итал., М., 1957; Т и х о н о в А. Н., С а м а р с к и й А. А., Уравнения математической физики, 5 изд., М., 1977. В. П. Павлов.

**НЕЙМАНА ПРИНЦИП** — постулат, устанавливающий связь симметрии макроскопич. физ. свойств кристалла с симметрией его внеш. формы. Согласно Н. п., группа симметрии любого физ. свойства  $G_{sv}$  должна включать в себя все элементы точечной группы симметрии кристалла  $K$ , т. е.  $K \subset G_{sv}$ . Т. о., физ. свойство может обладать более высокой симметрией, чем точечная группа кристалла. Н. п. утверждает лишь возможность существования у кристалла свойств, удовлетворяющих указанному условию, но не требует их обязательн. наличия, т. е. Н. п. является необходимым, но недостаточным условием существования у кристалла конкретных физ. свойств. Сформулирован Ф. Э. Нейманом (Ф. Э. Neumann).

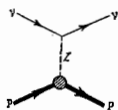
Наряду с Н. п. в кристаллофизике существует ещё один симметричный постулат — *Кюри принцип*. В отличие от Н. п., связывающего симметрии свойств и симметрию кристалла, не испытывающего внеш. воздействий, принцип Кюри позволяет определить симметрию кристалла под внеш. воздействием.

Лит.: Н а й Д ж., Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц, 2 изд., М., 1987; Современная кристаллография, т. 4 — Физические свойства кристаллов, М., 1981. Л. А. Пукалов.

**НЕЙМАНА — ЗЕЕЛЕНГА ПАРАДОКС** — то же, что *гравиационный парадокс*.

**НЕЙТРАЛЬНЫЙ ТОК** (нейтральный слабый ток) — теория *электрослабого взаимодействия* — фундам. операционал, описывающий взаимодействие кварков и лептонов с полем нейтрального промежуточного векторного бозона ( $Z$ -бозона) и обуславливающий переходы, в к-рых не изменяется электрич. заряд конечных и на-

чальных кварков и лептонов. Н. т.  $j_\mu(x)$  ( $x$  — пространственно-временная точка,  $\mu = 0, 1, 2, 3$ ) представляет собой сумму лептонного  $j_\mu^l(x)$  и адронного (кваркового)  $j_\mu^a(x)$  токов:  $j_\mu(x) = j_\mu^l(x) + j_\mu^a(x)$ , каждый из  $k$ -рых является смесью векторного и аксиального токов. Поэтому взаимодействия с участием Н. т. не сохраняют пространств. чётность. Примером процесса, обусловленного как лептонным, так и адронным Н. т., является упругое рассеяние нейтрино на протоне  $\nu + p \rightarrow \nu + p$  (рис.).



Взаимодействие Н. т. с полем  $Z_\mu(x)$  нейтрального  $Z$ -бозона описывается плотностью лагранжиана

$$\mathcal{L} = g_j^i(x) Z_\mu(x),$$

где  $g_j^i$  — безразмерная константа взаимодействия (в единицах  $\hbar = c = 1$ ), связанная с фундам. электрич. зарядом  $e$  и Вайнберга углом  $\theta_w$  соотношением:

$$e = g \sin \theta_w \cos \theta_w.$$

В области передаваемых импульсов, много меньших массы  $Z$ -бозона  $m_Z$ , взаимодействие Н. т. сводится к эфф. четырёхфермионному взаимодействию, описываемому плотностью гамильтониана вида:

$$H = \frac{2G_F}{\sqrt{2}} \rho_j(x) j_\mu^+(x), \quad (1)$$

где  $G_F$  — фермиевская константа слабого взаимодействия,  $\rho = m_W^2 / (m_Z^2 \cos^2 \theta_w)$  — параметр, характеризующий отношение интенсивности взаимодействия Н. т. и заряженных токов ( $m_W$  — масса зарядк. промежуточного бозона  $W$ ; знак + означает зримо-то сопряжение). Численное значение  $\rho$  зависит от детальной структуры спонтанного нарушения симметрии электрослабого взаимодействия за счёт Хиггса механизма. В электрослабой теории с одним дублетом Хиггса полей (или с нек. дублетами) предсказывается значение  $\rho = 1$  (с точностью до радиационных поправок). На опыте значение  $\rho$  также близко к единице:  $\rho = 0,99 \pm 0,02$ . Согласно теории электрослабого взаимодействия, Н. т. каждого из лептонов и кварков полностью определяется электрич. зарядом и значением проекции слабого изоспина  $I_3$  данной частицы:

$$j_\mu(x) = j_\mu^3(x) - \sin^2 \theta_w j_\mu^{\text{EM}}(x), \quad (2)$$

где  $j_\mu^3(x)$  — электромагнитный ток, а  $j_\mu^{\text{EM}}$  — ток третьей компоненты слабого изоспина. Напр., Н. т. нейтрино составляет  $1/\sqrt{2}(x) \gamma_\mu (1 + \gamma_5) \nu(x)$  (т. к.  $j_\mu^3$  для нейтрино равен нулю, а проекция слабого изоспина нейтрино равна  $1/2$ ), а для электрона Н. т. имеет вид:

$$\bar{e}(x) (-1/4 \gamma_\mu (1 + \gamma_5) + \sin^2 \theta_w \gamma_\mu) e(x)$$

[здесь  $\nu(x)$ ,  $e(x)$  — операторы нейтрино и электронного полей, черта над символами полей обозначает дураковское сопряжение,  $\gamma_\mu$ ,  $\gamma_5$  — Дирака матрицы].

Взаимодействие Н. т. вида (1), предсказанное теорией [Ш. Глэшоу (Sh. Glashow), 1961; С. Вайнберг (S. Weinberg), 1967; А. Салам (A. Salam), 1968], было открыто в опытах по рассеянию мюонных нейтрино на вдуках в пузырьковой камере «Гаргамель» (ЦЕРН, Швейцария, 1973). Для зарядк. частиц взаимодействие (1) маскируется более сильным (на много порядков) эл.-магн. взаимодействием. Однако взаимодействие (1) удаётся обнаружить благодаря тому, что в нём не сохраняется пространств. чётность, в отличие от эл.-магн. взаимодействия, в к-ром чётность сохраняется. Эффект несохранения чётности во взаимодействии электронов с нуклонами впервые был открыт в атомной физике по наличию оптич. активности (полютора плоскости поляризации линейно поляризов. света) паров атомарного висмута [Л. М. Барков, М. С. Золотарёв, 1978]. Несколько позднее этот же эффект наблюдался

при высокой энергии по разности сечений рассеяния лево- и правополяризов. электронов на водородо и дейтерии (СЛАК, США, 1978). Эти эксперим. результаты сыграли решающую роль в подтверждении существования взаимодействия вида (1) с Н. т., имеющим структуру (2), и, следовательно, в подтверждении теории электрослабого взаимодействия Глэшоу — Вайнберга — Салама в целом.

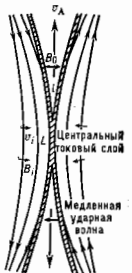
Н. т., определяемый ф-лой (2), диагонален по ароматам лептонов и кварков. Это означает, что в описываемых им процессах не изменяются квантовые числа лептонов и адронов. Существует, однако, понятие недиагональных Н. т. Оно относится к процессам, в к-рых изменяются квантовые числа адронов и лептонов без изменения их электрич. заряда. Примером такого процесса является распад долгоживущего нейтрального  $K$ -мезона ( $K_L$ ) на мюонную пару:  $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , в к-ром странность изменяется на единицу. Такие процессы возникают в высших порядках теории возмущений по электрослабому взаимодействию, и их вероятность весьма мала. Напр., относит. вероятность распада  $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$  составляет ок.  $10^{-8}$ . Процессы с Н. т., недиагональным по лептонам, на опыте не наблюдались. Наб. сильные эксперим. ограничения имеются для процессов превращения мюона в электрон в кулоновом поле ядра:  $\mu^+ + A \rightarrow e^+ + A$  (относит. вероятность менее  $4,6 \cdot 10^{-12}$ ) и для распада  $\mu \rightarrow e \nu$  (относит. вероятность  $5 \cdot 10^{-11}$ ). Сильная подавленность на опыте адронного и отстутствие лептонного недиагонального Н. т. налагает весьма ограничивающие условия на вид взаимодействия и спектр масс лептонов и кварков.

Лит.: О к у н ь Л. В., Лептоны и кварки, 2-й изд., М., 1980.

М. Э. Волькин

**НЕЙТРАЛЬНЫЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ** — слой тока высокой плотности, имеющий конечную толщину  $l$  и разделяющий две плазменные области с противоположно направленными магн. полями; в центре Н. т. с. магн. поле равно нулю. Понятие Н. т. с. возникает в гидродинамич. моделях пересоединения магн. силовых линий, используемых для объяснения, напр., солнечных вспышек (см. также *Магнитная гидродинамика*). В общем случае токковый слой разделяет магн. поля не обязательно противоположного направления, но магн. поле обязательно тангенциально по отношению к границе, т. е. токковый слой можно рассматривать как тангенциальный разрыв.

Токковые слои могут возникнуть при резком сжатии плазменной области вблизи нейтральной точки и на границе между двумя топологически разл. магн. конфигурациями при их сближении. В отсутствие магн. потока токковый слой распадается вследствие диффузии со скоростью  $\eta/l$ , где  $\eta$  — коэф. магн. диффузии. В процессе магн. диффузии энергия магн. поля превращается в тепловую за счёт столкновительной или коллективной диссипации. Магн. поле вне токкового слоя вморожено в плазму. Если плазма с магн. полем втекает в слой с боков (рис.) со скоростью  $v_i < \eta/l$ , то слой расширяется; если  $v_i > \eta/l$ , то слой становится тоньше. Повышенное плазменное давление в цент-



Пересоединение магнитных силовых линий при их проходе через нейтральный токковый слой.

ре слоя приводит к истечению вещества от концов слоя с альфовеской скоростью  $u$ . Вместе с веществом выносятся и магн. поток, поэтому в Н. т. с. происходит пересоединение магн. поля.

Концы токкового слоя разветвляются на две пары ударных волн медленной моды (см. *Волны в плазме*). К-рые остаются в установившемся потоке стоячими

водинами. Наличие этих волн увеличивает скорость пересоединения. Н. т. с. подвержен действию турбулентности. Изучение Н. т. с. важно, в частности, для объяснения солнечных вспышек и магнитосферных суббурь.

Лит.: Прист Е. Р., Солнечная магнитогидродинамика, пер. с англ., М., 1985; Основы физики плазмы, под ред. А. А. Галева, Р. Судана, т. 1—2, М., 1983—84.

## НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА

### Содержание:

Введение . . . . .	256
Космологические нейтрино . . . . .	256
Звёздные нейтрино . . . . .	256
Космические нейтрино высоких энергий . . . . .	257

### Введение

Н. а. изучает физ. процессы в космич. объектах, происходящие с участием нейтрино (Н.). Проблемы регистрации космич. Н. относятся к нейтринной астрофизике.

Н. во Вселенной подразделяют по их источникам генерации и энергетич. диапазону на космологические (реликтовые), звёздные и космич. Н. высоких энергий.

На ранних стадиях горячей Вселенной, в течение прибл. 1 с после начала расширения, Н. находились в тепловом равновесии с веществом. От этой эпохи нам осталась сильно остывший с тех пор газ космологич. Н. Его темп-ра в настоящее время равна 1,9 К, а ср. энергия  $5 \cdot 10^{-4}$  эВ.

В обычных звёздах, т.е. Солнца, Н. рождаются в ядерных реакциях, обеспечивающих наблюдаемую светимость. При звёздных коллапсах темп-ра в центре звёзд повышается настолько, что в тепловом равновесии оказываются позитроны, мюоны и пионы, к-рые образуют Н. в реакциях  $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ ,  $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$ ,  $\pi \rightarrow \mu + \nu$  и т. д. Энергии этих звёздных Н. находятся в осн. в диапазоне от долей до деск. десятков МэВ. Н. рождаются также космич. лучами. Ускоренные до высоких энергий протоны или др. атомные ядра, сталкиваясь с ядрами атомов газа или с низкоэнергетич. фотонами, производят  $\pi$ - и К-мезоны, в результате распада к-рых возникают космич. Н. высоких энергий. Их энергетич. диапазон, доступный регистрации, — от деск. десятков ГэВ до, возможно,  $10^{16}$ — $10^{18}$  эВ.

### Космологические нейтрино

Через время  $\sim 1$  с после начала расширения Вселенной её темп-ра упала до  $10^9$  К. Концентрация частиц в космич. плазме уменьшилась, свободный протон Н. увеличился настолько, что они вышли из теплового равновесия с плазмой. Горячий нейтринный газ, содержащий все три типа Н. (и антинейтрино), «отвалился» от вещества и, расширившись вместе со Вселенной, стал оставать как независимый, не взаимодействующий с веществом, компонент. Из связи с измеренной темп-рой фотонного газа (2,7 К) следует, что темп-ра нейтринного газа в настоящее время составляет 1,9 К (см. *Горячий Вселенной теория*). Это означает, что в ср. в  $1 \text{ см}^3$  космич. пространства содержится  $\approx 330$  Н. всех типов (включая антинейтрино) со ср. энергией каждой частицы  $\approx 5 \cdot 10^{-4}$  эВ. Пока нет практически осуществимого метода регистрации этих реликтовых Н. Тем не менее несомненное существование газа реликтовых Н. (косвенно оно подтверждается измерениями реликтовых фотонов аналогичного происхождения) позволяет получить ряд выводов об их роли в эволюции Вселенной.

Число типов Н. (электроны, мюонные, тау и, возможно, др.) влияет на синтез лёгких элементов (дейтерий, гелий, литий) в горячей Вселенной, поскольку от числа типов Н. зависит скорость расширения Вселенной на стадии нуклеосинтеза. Сопоставление указанных выше процессов с наблюдениями позволяет получить ограничения на свойства Н. Из наблюдаемого обилия космич. дейтерия следует, что число воз-

можных типов Н. не может превышать 4. При известной концентрации  $n$ , реликтовых Н. их масса должна быть такова, чтобы плотность нейтринного газа  $m_n n$  не приводила к возрасту Вселенной, меньшему, чем возраст наблюдаемых объектов, напр. Солнца или Галактики. Это даёт ограничение сверху на сумму масс всех типов Н.:  $\sum m_n v_i < 40 \text{ эВ}$ .

### Звёздные нейтрино

**Солнечные нейтрино.** Наблюдаемая светимость Солнца обеспечивается ядерной энергией, выделяющейся в *водородном цикле*. В реакциях  $p + p \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e$ ,  ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$  и  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$  этого цикла испускаются Н., называемые соответственно  $\nu_e$ - и  $\bar{\nu}_e$ -нейтрино, бериллиевые Н. и борные Н. Помимо них имеются ещё т. н.  $\nu_e$ - и  $\bar{\nu}_e$ -нейтрино  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$ , образующиеся при слиянии двух протонов и электрона:  $p + e + p \rightarrow {}^2\text{D} + \nu_e$ . Если Солнце — стандартный источник, то предсказываемое полное число Н., испускаемое в 1 с, не зависит от модели Солнца. Действительно, при превращении четырёх протонов в ядро гелия (в этом и состоит водородный цикл)  $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$  освобождается  $Q = 26,7$  МэВ ядерной энергии, к-рая в конце концов высвобождается как тепловая энергия с поверхности Солнца. Т. о., высвечение порции энергии  $Q$  сопровождается испусканием двух Н. Кол-во Н. ( $N_n$ ), излучаемых в 1 с, полностью определяется светимостью Солнца  $L_\odot = 3,8 \times 10^{33}$  эрг/с:

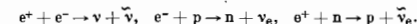
$$N_n = 2L_\odot/Q = 1,8 \cdot 10^{18} \text{ нейтрино/с.}$$

Однако энергетич. спектр излучаемых Н., и особенно высокоэнергетич. часть спектра, самым существенным образом зависит от таких деталей солнечных моделей, как темп-ра в центре Солнца и концентрация гелия, т. к. от этих параметров зависит конкуренция между разл. ответвлениями реакций водородного цикла. Энергии  $\nu_e$ -нейтрино, борных Н. и  $\nu_e$ -нейтрино сильно отличаются друг от друга. Макс. энергия  $\nu_e$ -нейтрино равна 0,420 МэВ,  $\nu_e$ -нейтрино и бериллиевые Н. имеют точно фиксированные энергии 1,44 мэВ и 0,861 МэВ соответственно. Наиб. энергии имеют борные Н.: их спектр простирается от нулевых энергий до 14,06 МэВ. Вычисление нейтринного потока для стандартной модели Солнца, выполненные Дж. Бакаллом (J. Bahcall, США), дают величину  $7,9 \pm 2,6$  SNU (SNU — Солнечная нейтринная единица, соответствует  $10^{26}$  захватов Н. в секунду на атом Cl), в то время как измеренный на установке Р. Дейвиса (R. Davis, США) ср. поток Н. (1970—1988) с энергией выше 0,814 МэВ составляет  $2,3 \pm 0,25$  SNU. Расхождение предсказываемого и измеренного значений может объясняться двумя общими причинами: А) более сложными физ. процессами в Солнце, не отражёнными в принятых моделях Солнца; эти процессы могут уменьшать поток Н. в измеренной в опыте Дейвиса высокоэнергетич. части спектра (акстремальная возможность, при к-рой происходит уменьшение полного потока Н., — это наличие другого источника энергии в Солнце, напр. маленькой чёрной дыры или тяжёлых реликтовых частиц, при аннигиляции к-рых выделяется необходимая энергия); Б) свойством Н. (напр., осцилляциями Н. (представление о них впервые введено Б. М. Понтекорво в 1957), распадом Н. на пути от Солнца до Земли, аномальным взаимодействием Н., приводящим к нерезервативной связи относительно импульса, и др.). Наиб. правдоподобная модификация стандартной модели Солнца может быть обусловлена наличием тяжёлых слабо взаимодействующих реликтовых частиц (космионов, или нимфов) в солнечном ядре, к-рые обеспечивают его дополнил. охлаждение. Другие возможности связаны с солнечными колебаниями и (или) периодич. перемешиванием вещества в центральных областях Солнца. Эти явления приводят к периодич. уменьшению темп-ры в центре Солнца и связанному с

шим уменьшению потока борных Н. В случае Б наиб. ест. возможность представляются нейтринные осцилляции, существование к-рых предсказывается теорией Н. с конечной массой покоя. Из-за сохранения лептонного числа в ядерных реакциях Солнце генерирует электронные Н.,  $\nu_e$ , к-рые являются смесью состояний с двумя разл. массами. При одинаковой энергии скорости распространения этих состояний различны, благодаря чему на нек-ром расстоянии от Солнца состав их смеси изменяется, а это означает появление примеси состояния другого Н. (напр., мюонного), к-рое не может вызвать превращения  $^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar}$  в детекторе Дейвиса. Осцилляции солнечных Н. могут быть наблюдаемы, если разность квадратов масс двух нейтринных состояний  $m^2 - m'^2 \approx 10^{-10} \text{ эВ}^2$ . Осцилляции Н. могут быть вызваны также их взаимодействием с веществом. В этом случае дефицит борных Н. можно объяснить т. н. резонансным усилением перехода электронных Н. в Н. др. типа в узком слое солнечного вещества с определенной плотностью.

Др. возможностью объяснения опыта Дейвиса является изменение спиральности Н. вследствие взаимодействия его магн. момента с магн. полем.

Нейтрино от коллапсирующих звёзд. Если масса звёздного ядра превышает 1,2–1,4  $M_\odot$ , то оно может превратиться в нейтринную звезду или чёрную дыру. На конечной стадии эволюции таких звёздных ядер их плотность возрастает до  $10^{10} - 10^{15} \text{ г/см}^3$ , а темп-ра — до  $10^{10} - 10^{12} \text{ К}$ . Осн. механизм потери энергии в этих условиях становится испускание Н., образующихся в реакциях



В качестве характерного примера приведём результаты расчёта потока Н., возникающего при коллапсе железно-никелевого ядра звезды с массой 2  $M_\odot$ . Суммарная энергия, уносимая Н., равна  $5 \cdot 10^{53}$  эрг, т. е. ок. 15% всей массы звезды, выраженной в энергетич. единицах. Ср. энергия отд. Н. составляет 10–12 МэВ, а энергетич. спектр близок к тепловому с более крутым падением при высоких энергиях. Длительное нейтринное излучение 10–20 с. Впускаемом нейтринном потоке присутствуют в равных концентрациях все типы Н. и антинейтрино. Это объясняется тем, что звёздное ядро влёт до очень больших расстояний от центра непрозрачно для Н. из-за процессов упругого рассеяния на электронах и ядрах. В результате все типы Н. оказываются в тепловом равновесии с веществом влёт до нек-рой поверхности (нейтриносфера), с к-рой испускание нейтрино происходит приоб. как с чернотельной поверхности. Если в нашей Галактике произойдёт коллапс звезды, её нейтринное излучение может быть зарегистрировано уже существующими телескопами.

При вспышке сверхновой SN 1987А сообщалось о регистрации Н. подземными детекторами КАМИОКАНДЕ (Япония), ИМБ (США), Ваксанским (СССР), а также о редком событии (5 импульсов в течение 7 с) в детекторе ИДС (СССР — Италия). Несмотря на нек-рые неясности, эти события интерпретируют как регистрацию Н. от коллапса, предшествующего взрыву сверхновой. Данные детектора КАМИОКАНДЕ с наиб. числом зарегистриров. Н. (11 за 13 с) удовлетворительно согласуются с имеющимися расчётами коллапса. Наблюдения сверхновой SN 1987А позволили получить более сильные (чем прежде) ограничения на свойства Н., в т. ч. на массу, магн. момент и сечение  $\nu\nu$ -рассеяния.

#### Космические нейтрино высоких энергий

Методы детектирования (регистрации) космич. Н. относятся к нейтринной астрономии. Задача нейтринной астрономии высоких энергий сводится исключительно к поиску точечных космич. источников Н.; только при сверхвысоких энергиях ( $E \approx 10^9$  ГэВ) ставится задача измерения диффузного потока Н.

Нейтринное излучение высокой энергии (30–1000 ГэВ) генерируется в космич. объектах в результате столкновений ускоренных частиц (космич. луч) с атомными ядрами (pp-нейтрино) или с низкоэнергетич. фотонами ( $\nu\gamma$ -е и  $\gamma$  и  $\nu$ ) в цепочке распадов заряд. пионов. При стелешном спектре ускоренных протонов число Н., генерированных в pp-взаимодействии, возрастает с уменьшением энергии, однако осн. вклад в сигнал от источника при детектировании дают Н. с энергией выше 30 ГэВ. Т. о., pp-нейтрино с энергией 30–1000 ГэВ определяют диапазон нейтринной астрономии высоких энергий.

В отличие от pp-нейтрино, рождение  $\nu\gamma$ -нейтрино происходит дорожным образом: в «фотонном газе» со ср. энергией фотонов е большая часть Н. рождается с энергией, превышающей  $E_0 \approx 4 \cdot 10^{-2} m_\pi \cdot c^2 m_p^2 / e \approx 6 \cdot 10^9$  ГэВ, где  $m_\pi$  и  $m_p$  — массы пиона и протона, а е выражено в эВ. Почти для всех известных источников толща окружающего газа невелика (меньше 1 г/см<sup>2</sup>), в то время как «фотонный газ» для ряда источников (напр., ядер активных галактик) имеет столь большую плотность, что источник оказывается непрозрачным для протонов высокой энергии. Это приводит к высокой эффективности генерации  $\nu\gamma$ -нейтрино. Для многих источников генерация  $\nu\gamma$ -нейтрино имеет пороговую энергию  $\approx 5 \cdot 10^6$  ГэВ. Регистрация Н. с  $E_0 \approx 5 \cdot 10^6$  ГэВ относится к нейтринной астрономии сверхвысоких энергий. Потери в интенсивности потока Н. сверхвысоких энергий вследствие падающего спектра протонов компенсируется повышенной эффективностью генерации  $\nu\gamma$ -нейтрино благодаря явчт. возрастанию сечения взаимодействия Н. в детекторе (вследствие резонансного характера реакции  $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow$  адроны, имеющего максимум в сечении при энергии  $\approx 6,4 \cdot 10^6$  ГэВ) и возможностью использования больших объёмов воды при детектировании Н. акустич. методом.

Нейтринная астрономия высоких и сверхвысоких энергий имеет ряд уникальных возможностей по сравнению с гамма-астрономией; в частности, она позволяет исследовать плотные объекты и отдалённые космологич. эпохи, недоступные средствам гамма-астрономии. Нейтринная астрономия высоких энергий может использовать лишь оптич. методы регистрации — при к-рых макс. объём детектора ограничен, но-видимому, величиной  $10^{10}$  м<sup>3</sup>. С детекторами такого объёма возможна регистрация галактич. источников и лишь единичных событий от внегалактич. источников. К наиб. интересным галактич. источникам Н. относятся двойные звёздные системы, молодые (до 1 года) оболочки сверхновых и «скрытые источники» — пульсары или чёрные дыры, окружённые большой толщей вещества.

Одним из галактических источников, от к-рых ожидается регистрируемый поток Н. высоких энергий, является тесная двойная система Лебедь X-3 (см. Гамма-астрономия). От этого источника зарегистрировано перемещение гамма-излучение высокой ( $\sim 10^9$  ГэВ) и сверхвысокой ( $\sim 10^4 - 10^5$  ГэВ) энергии, с периодом 4,8 ч. Предполагается, что гамма-излучение генерируется в результате взаимодействия ускоренных протонов с макс. энергией до  $10^{10} - 10^9$  ГэВ с атомными ядрами газа, окружающего массивную звезду двойной системы. Этот процесс сопровождается генерацией Н. высоких энергий. Мин. нейтринный поток, совместимый в рамках описываемой модели с наблюдаемым потоком гамма-излучения, должен быть зарегистрирован проектируемым установками «Байкал» (СССР) и ДЮМАНТ (США).

Др. типом «перспективных» нейтринных источников являются молодые оболочки сверхновых. В результате взрыва сверхновой происходит сброс оболочки звезды и в ряде случаев образование пульсара в центре. Молодые плотные оболочки сверхновых могут содержать частицы высоких энергий, ускоренные в разл. процессах (в частности, в магнитосфере пульсара). В оболочке с массой  $M \sim 1 M_\odot$  и скоростью расширения  $\sim 10^8$  см/с ускоренные протоны в течение  $\sim 5$  мес

теряют энергию гл. обр. на образование пионов в ядерных столкновениях, т. следовательно, в течение этого времени оболочка является активным нейтринным излучателем. При мощности генерации космич. лучей в оболочке  $\sim 10^{43}$  эрг/с она за 5 мес получает  $2 \cdot 10^{48}$  мюонных  $N$ -с энергией выше  $100$  ГэВ.

В качестве примера «скрытого источника»,  $K$ -рый должен проявляться в основном в нейтринном излучении, рассматривается модель массивной звезды-сверхгиганта с массой  $10 M_{\odot}$  и радиусом  $7 \cdot 10^{13}$  см. В центр. области звезды находится двойная система — пульсар и ядро массивной звезды, похожее на белый карлик. Если светимость пульсара составляет  $3 \cdot 10^{38}$  эрг/с, то давление излучения создаёт вокруг пульсара разреженную полость, где могут ускоряться протоны. Проникая в оболочку, они рождают там в цепочке распада пионов фотоны, электроны и  $N$ -, из  $K$ -рых только последние могут пройти сквозь толстый слой вещества ( $\sim 10^5$  г/см $^2$ ) наружу. Наблюдаемый во всех диапазонах эл.-магн. излучения, включая рентг. и гамма-диапазоны, источник будет выглядеть как обычная звезда-сверхгигант со светимостью  $\sim 10^{39}$  эрг/с и темп-рой  $2500$  К, и лишь регистрация  $N$ . высоких энергий может раскрыть его подлинную природу.

Из внегалактич. источников  $N$ . следует отметить активные ядра галактик и молодые галактики в фазе их повышенной светимости (яркая фаза). В последнем случае источником  $N$ . становится всё метagalactic. пространство, заполненное реликтовыми фотонами. Протоны, сталкиваясь с ними, рождают заряд. пионы, при распаде  $K$ -рых образуются  $N$ . Большие потоки  $N$ . возникают в том случае, если яркая фаза имела место при больших красных смещениях  $z > 10-20$ . Энергия реликтовых фотонов в эту эпоху была в  $(1+z)$  раз больше, чем теперь, благодаря чему в образовании пионов (и следовательно  $N$ .) принимали участие протоны меньших, чем теперь, энергий. Спектр  $N$ . несёт информацию о красном смещении эпохи яркой фазы: он имеет максимум при энергии, определенной только величиной  $z$ :  $\mathcal{E}_{\text{макс}} = 6 \cdot 10^9 [20(1+z)]^2$  ГэВ. Большие потоки  $N$ . могли возникнуть и на догалактич. стадиях.

Лит.: Герштейн С. С., Зельдович Я. Б., Масса лояной мюонной нейтринной и космология, «Письма в ЖЭТФ», 1966, т. 4, с. 174; Зельдович Я. Б., Новиков И. Д., Релятивистская астрофизика, М., 1967; Березинский В. С., Зацепин Г. Т., Возможности экспериментов с космическими нейтрино осевь высоких энергий: проект ДЮМАНД, «УФН», 1977, т. 122, с. 3; Новиков И. Д., Эволюция Вселенной, 3 изд., М., 1990; Астрофизика космических лучей, М., 1984; Имшененик В. С., Надёжин И. К., Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом облаке: наблюдения и теория, «УФН», 1988, т. 156, с. 561.

В. С. Березинский.

## НЕЙТРИНО

### Содержание:

Введение	258
История открытия $N$ .	258
Основные свойства $N$ .	259
Взаимодействия $N$ .	262
Смешивание и массы $N$ .	265

### Введение

$N$ . (символ  $\nu$ ) — лёгкая (возможно, безмассовая) электрически нейтральная не обладающая цветом частица со спином  $1/2$ .  $N$ . участвует в слабом и гравитацион. взаимодействиях, принадлежит к классу лептонов, а по статистич. свойствам является фермионом. Наблюдались  $N$ . трёх типов: электронные ( $\nu_e$ ), мюонные ( $\nu_{\mu}$ ) и  $\tau$ -нейтрино ( $\nu_{\tau}$ ) в соответствии с валентным трёх типов заряд. лептонов.  $N$ . каждого типа имеют античастицу — антинейтрино ( $\bar{\nu}$ ). Неустойчивы  $N$ . пока не обвращена. Отличит. свойствами  $N$ . являются исключительно большая проникающая способность при низких энергиях и быстрый рост сечений взаимодействий с увеличением энергии.

$N$ . — столь же часто встречающиеся объекты, как и фотоны. Они испускаются при превращениях атомных ядер и в распадах частиц ( $\mu$ ,  $L$ ,  $K$  и т. д.); процессы,

приводящие к образованию  $N$ ., происходят в недрах Земли, её атмосфере, внутри Солнца и др. звёзд; при этом  $N$ . (за редким исключением) беспрепятственно выходят из источников своего возникновения. Предсказываются генерации мощных нейтринных всплесков при гравитационных коллапсах звёздных ядер. Согласно модели горячей Вселенной, космич. пространство заполнено реликтовыми  $N$ . с энергией  $\sim 10^{-4}$  эВ и плотностью  $300$  в/см $^3$ . Потоки высокоэнергичных  $N$ ., вплоть до  $\mathcal{E} \sim 10^{21}$  эВ, генерируются во взаимодействиях космических лучей с межзвёздной средой. В лаб. условиях пучки  $N$ . создаются с помощью радиоактивных источников, ядерных реакторов, на ускорителях протонов высокой энергии ( $\gg 1$  ГэВ) и мюонных фабриках.

С уникальной проникающей способностью  $N$ . связано развитие таких направлений, как нейтринная астрофизика и нейтринная геофизика. При увеличении плотности вещества и пространства масштабы явлений роль  $N$ . возрастает. Наблюдаемые потоки  $N$ . несут информацию о процессах, происходящих в центре Солнца и межзвёздном пространстве, о ранней Вселенной и конечных стадиях эволюции звёзд (см. *Нейтринная астрофизика*). Предполагается использовать пучки  $N$ . для исследования строения Земли, поиска полезных ископаемых и т. д.

Изучение таких процессов с участием  $N$ ., как  $\beta$ -,  $\mu$ -,  $W$ -распады,  $\nu$ -рассеяние на нуклонах и электронах, сыграло решающую роль в построении и проверке теории электрослабого взаимодействия.  $N$ . из труднодоступного объекта превратилось в инструмент исследования структуры др. частиц.

### История открытия $N$ .

Гипотеза Паули. Теория Ферми. Представление о  $N$ . было введено в 1930 В. Паули (W. Pauli) с целью разрешить парадокс  $\beta$ -распада [1]. Первый из них касался «несохранения энергии». При переходе между двумя стационарными состояниями ядер вылетали электроны с произвольными энергиями вплоть до нек-рой граничной; их спектр, впервые измеренный в 1914 Дж. Чедвиком (J. Chadwick) в распаде  $^{210}\text{Bi}(\text{RaE}) \rightarrow ^{210}\text{Po} + e$ , оказался непрерывным. Ни потеря энергии при вылете электронов из атомов, ни эл.-магн. излучения, сопутствующего электронам, не было обнаружено [калориметрич. эксперимент Ч. Эллиса (Ch. Ellis) и У. А. Вустера (W. A. Wooster)]. Второй парадокс состоял в нарушении Паули теоремы о связи спина со статистикой: у начального и конечного ядра в  $\beta$ -распаде статистика одинакова (т. к. одинаковые ат. номера  $A$ ), и, следовательно, электрон должен был бы подчиняться Бозе — Эйнштейна статистике. В действительности же он подчиняется Ферми — Дирака статистике, т. к. его спин равен  $1/2$ .

В письме участникам семинара в Тьубингене (Германия) Паули высказал гипотезу о существовании новой электрически нейтральной сильно проникающей частицы («нейтрона») со спином  $1/2$ . В  $\beta$ -распаде с каждым электроном испускается такой «нейтрон», причём сумма энергий электрона и «нейтрона» постоянна. Т. о. оба парадокса были разрешены. Остался вопрос: как удерживается  $N$ . в ядре? Его решение было связано с открытием в 1932 «стающегося» нейтрона и построением в 1934 Э. Ферми (E. Fermi) теории  $\beta$ -распада [при этом Ферми предложил называть частицу Паули уменьшительно от «нейтрон» — «нейтрино» (итал.)]. Подобно тому, как возбуждённый атом испускает фотон, в  $\beta$ -распаде один из нейтронов ядра испускает пару — электрон и  $N$ . (точнее, антинейтрино), и превращается в протон:



(для  $\beta^+$ -распада соответственно:  $p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e$ ). В исходном ядре  $N$ . нет. Согласно теории Фер-

ки, взаимодействие всех 4 частиц, происходит в одной точке пространства одновременно. Эта теория объясняла осн. черты  $\beta$ -распада [форму спектра, связь граничной энергии ( $Q$ ) со временем распада] и, т. о., являлась первым подтверждением гипотезы о Н. Были предсказаны новые процессы с участием Н.: обратный  $\beta$ -распад

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+ \quad (2)$$

и электронный захват:

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e. \quad (3)$$

Первые эксперименты по обнаружению Н. Несмотря на успех теории Ферми, требовались качественно новые подтверждения реальности Н. как частицы. Кроме энергии Н. должно усвоить импульс. Первые эксперименты, проведённые в 1936 А. И. Лейпукусим, дали лишь слабые указания на неколлинеарность импульсов электрона и конечного ядра в  $\beta$ -распаде. В 1938 А. И. Алиханов и А. И. Алиханян предложили исследовать отдачу ядра  ${}^7\text{Li}$  в реакции К-захвата:  ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$ , в к-рой импульс  ${}^7\text{Li}$  должен быть равен по величине и противоположен по направлению импульсу  $\nu_e$ . Эксперимент был осуществлён Дж. Алленом (J. Allen) в 1942, и его результаты оказались в согласии с предсказаниями [2].

Решающим доказательством того, что Н. — физ. частица, является обнаружение её взаимодействий на нек-ром расстоянии от точки рождения. Эксперименты по поиску ионизации воздуха под действием Н. не привели к положительным результатам [Чедвик и др., 1933, М. Намиас (M. E. Nahmias), 1934]. Лишь через 23 года после формулировки гипотезы Паули успех был достигнут на пути регистрации обратного  $\beta$ -распада (2). Ещё в 1934 Х. Бете (H. A. Bethe) и П. Пайерлс (R. Peierls), используя теорию Ферми, оценили вероятность этого процесса, к-рая оказалась исключительно малой. Она соответствует тому, что Н. с энергией 3—10 МэВ должно пройти в среднем расстояние в 100 световых лет в веществе с плотностью воды, прежде чем испытает взаимодействие. Регистрация столь редких событий стала возможной лишь после создания ядерных реакторов, являющихся мощными источниками антинейтрино, и больших водородосодержащих сцинтиллят. детекторов. Эксперимент был осуществлён Ф. Райнсом (F. Reines) и К. Коузном (C. L. Cowan) в 1953—56 [3] (рис. 1). Реакция (2) происходила под действием  $\bar{\nu}_e$  от реактора

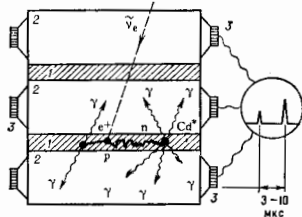


Рис. 1. Схема установки Райнса — Коузона (1956—57): 1 — мишени; 2 — сцинтилляционные детекторы; 3 — ФЭУ.

на протонах, содержащихся в воде, в к-рой была растворена соль  $\text{CdCl}_2$ . Регистрировались оба продукта реакции —  $e^+$  и  $n$ . Позитрон практически мгновенно тормозился и аннигилировал с электроном среды, давая первую сцинтиллят. вспышку. Нейтрон, рассеиваясь на водороде, замедлялся в течение 5—10 мкс и затем захватывался ядром кадмия; образовавшееся возбуждённое ядро  $\text{Cd}^*$  испускало  $\gamma$ -кванты с энергиями 3—40 МэВ, к-рые, попадая в детекторы, давали вторую

сцинтиллят. вспышку. Характерная цепочка событий — две вспышки с интервалом 5—40 мкс позволяла с помощью техники запаздывающих совпадений достаточно надёжно выделить сигнал из фона. Измеренное сечение реакции (2) находилось в согласии с предсказанием.

Мюонные Н. Представление о мюонных Н., отличающихся от электронных Н., испускаемых при  $\beta$ -распаде, возникло в связи с изучением распадов мюона,  $\mu$ - и К-мезонов. Было установлено, что распады этих частиц сопровождаются вылетом Н.:

$$\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu(\bar{\nu}_\mu) + \nu_e(\bar{\nu}_e) + e^+, \quad (4)$$

$$\pi^+ \rightarrow \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + \mu^+, \quad (5)$$

$$K^+ \rightarrow \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + \mu^+. \quad (6)$$

На нетождественность  $\nu_\mu$  и  $\nu_e$ , т. е. частиц, к-рые рождаются вместе с мюонами и элентронами, указывало отсутствие каналов распада  $\mu \rightarrow e, \mu \rightarrow e^+e^-$  и др. Идею о двух типах Н. сформулировали в 1957 М. А. Марков, Ю. Швингер (J. Schwinger), К. Нishijима (K. Nishijima) и др. [4], а её проверка [предложенная Б. М. Понтекорво и независимо от него М. Шварцем (M. Schwartz)] была осуществлена в экспериментах на ускорителях в Брукхейвене, США (1962, Л. М. Ледерман (L. M. Lederman), М. Шварц, Дж. Стейнбергер (J. Steinberger)) и в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН), Швейцария (1964). Было показано, что во взаимодействиях Н. от распадов (5) и (6) с ядрами мишени рождаются мюоны:  $\nu_\mu + p \rightarrow p + \mu^-$  и не происходит генерации электронов. Так были открыты мюонные Н.

$\tau$ -нейтрино. В 1975 в Станфорде (США) на встречных  $e^+e^-$ -пучках груной физиков во главе с М. Л. Перлом (M. L. Perl) в реакции  $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$  был открыт новый, тяжёлый лептон с массой ок. 1,8 ГэВ —  $\tau$ -лептон (см. *Тау-лептон*) [6]. Анализ энергетич. спектров электронов и мюонов, образующихся при распаде  $\tau$ -лептона, показал, что кроме  $e^-$  или  $\mu^-$  рождаются ещё два Н.:

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+(e^+) + \nu_\mu(\nu_e) + \bar{\nu}_\tau, \quad (7)$$

$$\tau^- \rightarrow e^-(\mu^-) + \bar{\nu}_e(\bar{\nu}_\mu) + \nu_\tau. \quad (8)$$

Одно из них соответствует мюону или электрону, другое —  $\tau$ -лептору. Отличие  $\nu_\tau$  от  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$  подтверждается существованием сильных запретов на моды распада  $\tau \rightarrow \mu\nu, \tau \rightarrow e\nu, \tau \rightarrow e^+e^-\nu$ , равенством вероятностей распадов  $\tau \rightarrow \mu\nu$  и  $\tau \rightarrow e\nu\nu$ , а также отрицат. результатами поиска  $\tau$ -лептонов во взаимодействиях пучков  $\nu_\mu$  и  $\nu_e$  с веществом.

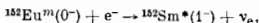
### Основные свойства Н.

Спин и спиральность Н. Величина спина Н. устанавливается с помощью закона сохранения угл. момента по известным спином частиц, участвующих в реакциях вместе с Н. При этом используются доп. соображения: правила отбора для разрешённых ядерных переходов, форма спектров заряд. частиц в распадах, точность взаимодействий.

Во всех проведённых экспериментах Н. проявлял себя как частицы с определённой спиральностью  $\lambda$ : Н. — как левополяризованные ( $\lambda = -1/2$ ), антинейтрино — как правополяризованные ( $\lambda = +1/2$ ). (В статье использована система единиц, в к-рой  $\hbar = c = 1$ .) Этот факт при ненулевой массе Н.  $m_\nu \neq 0$  объясняется ( $V-A$ )-структурой взаимодействий (см. *Слабые взаимодействия*) и ультрельativистическим характером излучавшихся Н. ( $p_\nu \gg m_\nu$ ). В этом случае применимостояния с противоположной спиральностью, т. е. Н. с  $\lambda = +1/2$  или антинейтрино с  $\lambda = -1/2$ , подавлены фактором  $(m_\nu/p_\nu)^2$ . Если Н. безмассовые и описываются *Вейля уравнениями*, то строго фиксированная спиральность — не только следствие ( $V-A$ )-характера взаимодействий, но и свойство самих Н. (см. ниже).

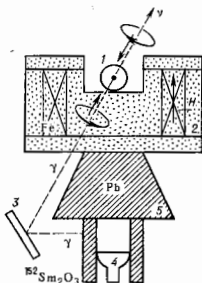


Первый эксперимент по измерению спиральности  $N$  был проведён в 1958 в Брукхауэне М. Голдхабером (M. Goldhaber), Л. Гродзинском (L. Grodzins) и Э. У. Суьларом (A. W. Sulyard) (рис. 2). Он состоял в изучении  $K$ -захвата метастабильным ядром европия-152:

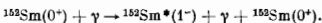


с образованием возбуждённого ядра  $\text{Sm}^*$ . Последнее испускает  $\gamma$ -квант при переходе  $^{152}\text{Sm}^*(1^-) \rightarrow ^{152}\text{Sm}(0^+)$  (в скобках указаны спин и чётность ядер).

Рис. 2. Схема эксперимента М. Голдхабера, Л. Гродзинса, Э. У. Суьлара: 1 — радиоактивный препарат  $^{152}\text{Eu}$ ; 2 — магнитный анализатор (намагниченное железо) для определения поляризации  $\gamma$ -кванта (рассеяние  $\gamma$  зависит от относительной поляризации  $\nu$  и  $\epsilon$ ); 3 — мишень, содержащая  $^{152}\text{Sm}$  (резонансное рассеяние происходит в том случае, если  $\nu$  и  $\gamma$  испускаются в противоположных направлениях); 4 — детектор; 5 — свинцовый зашит.



Отбразился события, в  $K$ -рых спиральность  $\nu_e$  и поляризация  $\gamma$ -кванта ( $\lambda_\gamma$ ) были однозначно связаны. Для этого использовали резонансное рассеяние  $\gamma$  на ядрах самария:



Измерения поляризации  $\gamma$ -квантов проводили с помощью их рассеяния на магнитик. железе. По измеренной  $\lambda_\gamma$  была найдена спиральность  $N$ .  $\lambda_\gamma$ . Результат эксперимента:  $\lambda_\gamma \approx -1/2$  в своё время являлся решающим аргументом в пользу векторного, ( $V-A$ ), а не тензорного варианта теории.

Определение спиральности мюонного  $N$ . Основано на измерении спиральности мюона в распаде (5):  $\lambda(\nu_\mu) = \lambda(\mu^-)$ . Результаты с высокой точностью подтверждают значение  $\lambda_\mu = -1/2$ :  $1 \geq 2 |\lambda_\mu| \geq 0,9966$ .

Массы  $N$  каждого типа много меньше масс соответствующих заряд. лептонов ( $l$ ):

$$m(\nu_l) \ll m(l), \quad (9)$$

$l = e, \mu, \tau$ . При этом не исключено, что все  $N$  или часть из них — безмассовы. Пока эксперим. поиски дают определять лишь верхние ограничения на  $m_\nu$ . Неравенство (9) означает выделенность  $N$  по массам:  $N$  значительно легче всех остальных частиц, принадлежащих данному поколению фермионов [массы кварков и заряд. лептонов в одном поколении близки или имеют расщепление, много меньшее, чем в (9)].

Прямые измерения масс состоят в исследовании кинематики процессов с участием  $N$ . Наличие у  $N$  ненулевой массы изменяет фазовые объёмы реакций, модифицирует форму энергетич. спектров частиц, рождающихся вместе с  $N$ , в частности сдвигает их граничные точки  $Q$  и уменьшает импульсы сопутствующих  $N$  частиц. Э л е к т р о н и  $\nu_e$ .  $N$ . Наиболее чувствит. методом является измерение энергетич. спектра электронов [т. н. кривой Кёри ( $\epsilon_e$ )] для  $\beta$ -распада трития:



(рис. 3). Массивность  $N$  должна проявиться в уменьшении числа распадов с энергиями электронов  $\epsilon_e$ , лежащими вблизи граничной точки,  $\epsilon_e \approx Q = 18,6$  кэВ. В 1980 группой сов. физиков (В. А. Любимов и др.)

Инт-та теоретич. и эксперим. физики (ИТФЭ, Москва) были получены указания на то, что  $m_\nu \neq 0$ . В эксперименте использовались молекулы органич. соединений — атомы, в  $K$ -ром часть атомов водорода была заменена атомами трития; энергии электронов измерялись с помощью магн. спектрометра (рис. 4). Данные (экспе-

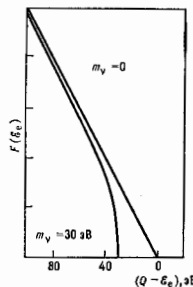


Рис. 3. График Кёри вблизи граничной точки без учёта фона и ноченной разрешающей способности детектора.

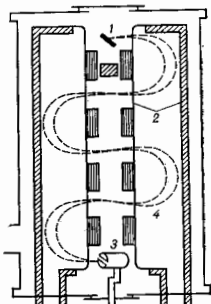


Рис. 4. Установка ИТФЭ для измерения массы нейтрино: 1 — источник; 2 — витки магнитного спектрометра; 3 — ФЭУ; 4 — траектории электронов.

рим. кривая Кёри) подгонялись двумя параметрами: массой  $m_\nu$  и граничной точкой спектра  $Q$ . Наилучшая подгонка соответствовала  $m_\nu = 26(2)$  эВ. Неопределённость результата ИТФЭ, связанная с учётом сложного молекулярного спектра в конечном состоянии (для описания  $K$ -рого используются модельные представления), а также с потерями энергии вылетающих электронов, дают  $m_\nu$  в диапазоне (17—40) эВ. В 1985—90 были опубликованы результаты новых экспериментов с тритием,  $K$ -рые не подтвердили вывода группы ИТФЭ. Полученные ограничения:  $m_\nu < 15,4$  эВ с уровнем достоверности (у. д.) 95% (Цюрих),  $m_\nu < 12,5$  эВ с у. д. 95% (Лос-Аламос),  $m_\nu < 11$  эВ с у. д. 95% (Токио).

В 1967 Г. Т. Зацепин высказал идею ограничения  $m(\bar{\nu}_e)$  из наблюдений нейтриноного сигнала от гравитаци. коллапса звезды. Поскольку массивные  $N$  с разными энергиями имеют разные скорости, в процессе распространения от звезды к Земле должно происходить увеличение протяжённости  $\nu$ -сигнала и «выстривание»  $N$  по энергиям: первыми на установку должны приходиться  $N$  с наиб. энергиями и т. д. Нейтринный сигнал, зарегистрированный от сверхновой SN 1987А, не обнаружил таких эффектов, что позволило поставить верхний предел  $m_\nu < (10-20)$  эВ.

М у о н и  $\nu_e$  е  $N$ . Наиб. строгие ограничения на массу  $m(\nu_\mu)$  даёт исследование распада пиона (5). В случае покоящегося л масса  $\nu_\mu$  однозначно связана законами сохранения энергии-импульса с массой пиона и импульсом мюона  $p_\mu$ . Измерения  $p_\mu$  с помощью магн. спектрометра на мезонной фабрике SIN (Швейцария) позволили поставить ограничение  $m(\nu_\mu) < 0,25$  МэВ с у. д. 90%.

т н е й т р и н о. Лучшие ограничения на массу  $\nu_\tau$  получены при исследовании мод распада  $\tau$ -лептона с подавленным фазовым объёмом:  $\tau \rightarrow K\nu_\tau, 5\pi_\tau, 6\pi_\tau$ . Массивность  $\nu_\tau$  должна проявиться в искажении спектра инвариантных масс адронов,  $M_{\text{inv}}$ , в частности в сдвиге граничной точки спектра к меньшим  $M_{\text{inv}}$ . Такие эффекты не обнаружены, поставлен верхний предел  $m(\nu_\tau) < 35$  МэВ (с у. д. 95%).

Существует т. н. космологич. ограничение на сумму масс стабильных Н. всех типов [8]:

$$\sum_i m(\nu_i) = m(\nu_e) + m(\nu_\mu) + m(\nu_\tau) + \dots < 40 \text{ эВ.} \quad (11)$$

Оно следует из нижнего ограничения на возраст Вселенной и наблюдаемой скорости её расширения. Космологич. ограничение значительно сильнее верхних лаб. пределов для  $m(\nu_\mu)$  и  $m(\nu_\tau)$ . Но если Н. нестабильны, ограничение (11) обладает и при достаточном быстрых распадах может исчезнуть.

Предположения о том, что Н. смешиваются и/или являются истинно нейтральными частицами (для к-рых частица и античастица тождественны), открывают доп. возможности измерений их масс [поиск двойного бета-распада, осцилляции Н. (см. ниже)] и т. д.). Получаемые при этом результаты неоднозначны: ограничения на массы зависят от параметров нарушения закона сохранения лептонных чисел (см. ниже).

Уравнения свободного движения Н. Свойства симметрии Н. Существуют три возможности описания свободного движения Н. — нейтральной синворной частицы с не установленной пока величиной массы. Эти описания соответствуют Н. с отличающимися свойствами, к-рые должны проявляться во взаимодействиях.

Дираковскими и наз. массивные ( $m_\nu \neq 0$ ) Н., свободное движение к-рых описывается Дирака уравнением. Эти Н. имеют 4 независимых компонента: Н. с проекциями спина  $s = +1/2$  и  $s = -1/2$  на заданную ось и антинейтрино с  $s = +1/2$  и  $s = -1/2$ . Ур-ния движения и соответствующий лагранжиан обладают  $C$ -,  $P$ -,  $CP$ -, а также глобальной  $U(1)$ -симметриями (см. Зарядовое сопряжение, Пространственная инверсия,  $CP$ -инвариантность, Унитарная симметрия). Последнюю симметрию в случае Н. и лептонов связывают с сохранением лептонного числа ( $L$ ).  $L$  позволяет описать различие между Н. и антинейтрино:  $L(\nu) = +1$ ,  $L(\bar{\nu}) = -1$ .

Вейлевскими и наз. двухкомпонентные безмассовые Н., свободное движение к-рых описывается ур-нием Вейля. Релятивистски ковариантные ур-ния для двухкомпонентных волновых ф-ций, отвечающих частицам со спином  $1/2$  и массой 0, были построены Г. Вейлем (H. Weyl) в 1929. Они не обладают ни  $C$ -, ни  $P$ -симметрией, но инвариантны относительно  $CP$ -преобразований. Решения ур-ний Вейля имеют строго фиксированную спиральность. В 1957 Л. Д. Ландау, Ли (Lee Tsung Dao), Ч. Янг (Yang Chen Ning), А. Салам (A. Salam) предложили в связи с открытием несохранения четности использовать одно из ур-ний Вейля, а именно:  $i\partial\psi/\partial t = (i\nabla\psi)$ , для описания Н. (здесь  $\psi = -\lambda$  — Дирака матрица). Это ур-ние определяет левое Н.:  $\lambda = -1/2$ . Античастица описывается сопряженным ур-нием и имеет спиральность  $+1/2$ . Ур-ние Вейля инвариантно относительно  $U(1)$ -преобразований, связанных в данном случае с сохранением лептонного числа (обладает  $L$ -симметрией):  $L(\nu) = +1$ ,  $L(\bar{\nu}) = -1$ ; различие  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  — абсолютное.

Майорановскими и наз. истинно нейтральные Н. Они описываются ур-нием Дирака с доп. условием:

$$\psi^c = \eta_c \psi, \quad (12)$$

где  $\psi^c$  — зарядово-сопряженная волновая ф-ция, а фактор  $\eta_c$  удовлетворяет равенству  $|\eta_c|^2 = 1$  и наз.  $C$ -фазой. Такие Н. впервые исследовались Э. Майораной (E. Majorana, 1937) в связи с отрицат. результатами поиска маг. момента Н. ( $\mu$ ). У истинно нейтральных Н. вследствие (12)  $\mu = 0$ . Условие (12) сокращает число независимых решений ур-ния Дирака до двух, отличающихся только проекциями спина (спиральностями). Т. о., майорановские Н. двухкомпонентны, Н. и антинейтрино в силу (12) совпадают, все сопрягающиеся заряды равны нулю. Ур-ние и лагранжиан свободного

движения  $C$ -,  $P$ -, а также  $CP$ -инвариантны.  $CP$ -инвариантность позволяет ввести  $CP$ -фазу  $\eta_{CP} = \hat{C}\hat{P}\psi = e^{i\varphi} \psi^c$ , где  $\varphi$  — Дирака матрица, а  $\eta_{CP} = \pm i$  является физической наблюдаемой величиной, определяющей вероятность безнейтринного двойного  $\beta$ -распада, пирины распадов самого Н. (если оно вообще распадается) и др.

Дираковские, вейлевские и майорановские Н. отличаются структурой массовых членов в лагранжиане ( $\mathcal{L}_m$ ). В первом случае  $\mathcal{L}_m^D = -m\bar{\psi}\psi$ , во втором —  $\mathcal{L}_m^W = 0$ , в третьем, в силу условия (12),  $\mathcal{L}_m^M = -1/2 \eta_{CP} m \bar{\psi} \psi^c$  (где  $\psi$  и  $\psi^c$  — левые и правые компоненты волновых ф-ций; черта над  $\psi$  означает дираковское сопряжение). Дираковское Н. можно представить как совокупность двух майорановских Н. с равными массами и противоположными  $CP$ -четностями. Вейлевское Н. (при  $(V-A)$ -структуре нейтринных токов) совпадает с безмассовым майорановским Н. Т. о., дираковские и вейлевские Н. являются частными случаями системы майорановских Н.

С точки зрения феноменологии (см. ниже), удобно ввести лептонное число и для майорановских Н. Аналогично дираковским и вейлевским Н. им приписывают:  $L(\psi_L) = +1$ ,  $L(\psi_L^c) = -1$ . Но в этом случае лептонное число не сохраняется, причём его нарушение обусловлено массовыми членами:  $L(\mathcal{L}_m^M) = 2$ . Осуществить между разл. описаниями Н. позволяют в принципе эксперименты по измерению масс Н. и поиску эффектов нарушения лептонного числа,  $|\Delta L| = 2$ .

Неожиданность Н. и антинейтрино. Понятие о Н. и антинейтрино для любого из рассмотренных выше случаев можно ввести на основе взаимодействий. Частица, рождающаяся в распадах вместе с заряд. антилептоном (позитроном,  $\mu^+$  или  $\tau^+$ ), называется Н. Антинейтрино определяют как частицу, возникающую вместе с заряд. лептоном (электроном,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$ ): Н. рождается при захвате лептона, антинейтрино — при поглощении антилептона и т. д. Введённые так Н. и антинейтрино различаются во взаимодействиях с др. частицами и рождают лептоны и не рождают антилептоны,  $\bar{\nu}$  напротив, рождают  $e^+$ ,  $\mu^+$ ,  $\tau^+$  и не рождают  $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$ . Впервые различие Н. и антинейтрино было установлено и эксперимент Р. Дейвиса (R. Davis, Брукхейвен, 1955), к-рый основывался на хлор-аргоновом методе (Понтекорво, 1946) и состоял в следующем. Источником  $\bar{\nu}$  являлся атомный реактор, мишенью — бак с 10 т перхлорэтана  $C_2Cl_4$ . Если  $\bar{\nu}$  совпадает с  $\nu$  и, значит, может рождать электрон, то должна происходить реакция  $\bar{\nu} + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$ . Образующийся атом  ${}^{37}\text{Ar}$  со временем  $T_{1/2} = 35$  сут испытывает  $K$ -захват, переходя в возбуждённый атом хлора:  ${}^{37}\text{Ar} + e^- \rightarrow {}^{37}\text{Cl}^* + \nu_e$ . Возбуждение  $\text{Cl}^*$  снимается испусканием электрона с энергией 2,8 кэВ. Этот электрон детектирует пропорц. счётчиком. Была разработана методика, позволявшая из 10 т  $C_2Cl_4$  извлекать десятки атомов аргона. Оказалось, что кол-во атомов  ${}^{37}\text{Ar}$  по крайней мере в 20 раз меньше ожидаемого при  $\bar{\nu} = \nu$ ; эффект перекрытия состояний  $|\bar{\nu}_e\rangle$  и  $|\nu_e\rangle$ ,  $|\bar{\nu}_e\rangle|\nu_e\rangle^2$  составил не более 5%.

Др. метод проверки неожиданности  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$  реализуется в ускорит. экспериментах. Источником  $\nu_e$  является распад  $K \rightarrow e^+\nu_e$ ; в пузырьковых камерах-мишенях ведётся поиск позитронов. Избытка  $e^+$ , обусловленного реакцией  $\nu_e + N \rightarrow e^+ + X$  (здесь  $X$  — совокупность остальных частиц), не было обнаружено, что дало ограничение на  $|\bar{\nu}_e\rangle|\nu_e\rangle^2$  на уровне долей процента.

Наибольшую чувствительность к перекрытию состояний  $|\bar{\nu}_e\rangle$  и  $|\nu_e\rangle$  имеют эксперименты по поиску безнейтринного двойного  $\beta$ -распада. При таком распаде Н., испущенные одним из нейтронов ядра,

$p + \bar{p} + e^+ + \bar{\nu}_e$ , взаимодействует с другим нейтроном того же ядра. В результате рождаются два электрона, а ядро увеличивает свой заряд на две единицы:  $2X \rightarrow 2Z_2X + e^+ + e^-$ . Из факта ненаблюдения двойного безнейтринного  $\beta$ -распада следует, что величина

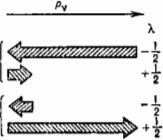


Рис. 5. Спиральности в состоянии левого нейтрино и правого антинейтрино. Длины стрел условно соответствуют вероятности обнаружить  $\lambda_L = +1/2$  и  $\lambda_R = -1/2$ .

$|\langle \bar{\nu}_e | \nu_e \rangle|^2$  не превышает  $10^{-12}$  (при нормировке  $|\langle \bar{\nu}_e | \nu_e \rangle|^2 = 1$ ).

Неотжественность  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  может быть связана с разлнчим их лептонным числом:

$$L(\nu_e) = L(e^-) = 1, \quad L(\bar{\nu}_e) = L(e^+) = -1.$$

При  $(V - A)$ -структуре взаимодействия Н. и антинейтрино имеют разные киральности:  $\nu$  — левую,  $\bar{\nu}$  — правую (рис. 5). Если др. отличий нет (сохранение лептонного числа нарушено), то перекрытие состояний  $|\nu\rangle$  и  $|\bar{\nu}\rangle$  в пределе  $\sigma_\nu \gg m_\nu$  равно  $|\langle \nu | \bar{\nu} \rangle|^2 \approx m_\nu^2 / \sigma_\nu^2 \ll 1$ ; этого «сверхмалого» подавления достаточно для того, чтобы удовлетворить эксперим. ограничениям. Если лептонное число сохраняется строго, то  $|\langle \nu | \bar{\nu} \rangle|^2 = 0$ .

Лагранжиан взаимодействия в теории Вайнберга — Глашоу — Салама (ВГС) [стандартной теории электрослабого взаимодействия] обладает  $L$ -симметрией. Поэтому в случае дираковских или вейлевских Н. перекрытия состояний  $|\nu\rangle$  и  $|\bar{\nu}\rangle$  нет, различие между  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  абсолютно  $[L(\nu) = -L(\bar{\nu})]$ .

У майорановских Н. лептонное число нарушено, и  $\bar{\nu}$  взаимодействует только киральностью, и их перекрытие пропорц. величине  $m_\nu^2 / \sigma_\nu^2$ . Экспериментально обнаружимым следствием является безнейтринный двойной  $\beta$ -распад с вероятностью, пропорц. квадрату майорановской массы Н. Отрицат. результат поиска такого распада позволяет поставить верхний предел для  $m_\nu$ . Геохим. методом, основанном на поиске дочернего изотопа, наиб. сильное ограничение получено для моды  $^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe} + e^- + e^- : T_{1/2} \gg 5 \cdot 10^{24}$  лет (с у. д. 90%). Отсюда следует, что  $m_\nu \ll (0.4 - 1.4)$  эВ. Прямыми электронными методами может быть измерен спектр опергоизлучений или спектр суммарной энергии двух электронов. Лучшее ограничение, установленное т. о. для распада  $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se} + 2e^- : T_{1/2} \gg 2 \cdot 10^{24}$  лет (с у. д. 90%), соответствует  $m_\nu \ll (0.6 - 1.5)$  эВ. Эти ограничения относятся к майорановской массе Н., точнее к эфф. массе  $m_\nu^{\text{eff}} = \sum_i u_i^* m_i$  ( $m_i$  — майорановские массы нейтрино  $\nu_i$ , имеющие примесь  $u_i$  в электронном Н.), и не противоречат большим значениям  $m_i$ , к-рые могли быть получены из кепматрич. измерений.

Типы Н. Тип Н. фиксируется его составствием определ. заряд. лептону. Соответствие устанавливается по взаимодействию; так, электронным называют Н., к-рое переходит в электрон либо рождается вместе с позитроном или при захвате электрона. Состояния  $|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle, |\nu_\tau\rangle$  наз. собств. состояниями гамилтониана слабого взаимодействия.

Отрицат. результаты поиска  $e^+$  и  $e^-$  во взаимодействиях пучков  $\nu_e$  ( $\bar{\nu}_e$ ), а также  $\mu$  и  $\tau$  во взаимодействиях пучков  $\nu_e$  ( $\bar{\nu}_e$ ) дают верхние пределы для перекрытия состояний  $|\langle \nu_e | \nu_\mu \rangle|^2$  на уровне долей процента,

$|\langle \nu_e | \nu_\mu \rangle|^2$  и  $|\langle \bar{\nu}_e | \bar{\nu}_\mu \rangle|^2$  на уровне неск. процентов.

Соответствие между Н. и определ. заряд. лептонами, а также различия  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  описываются набором трёх лептонных чисел: электронных, мюонных и  $\tau$ -лептонных ( $L_e, L_\mu, L_\tau$ ). Водят след. значения лептонных чисел: у  $\nu_e$  и  $e^- - (1, 0, 0)$ , у  $\nu_\mu$  и  $\mu^- - (0, 1, 0)$ , у  $\nu_\tau$  и  $\tau^- - (0, 0, 1)$ . Лептонные числа античастиц имеют противоположные знаки. Числа  $L$  сохраняются в известных процессах. Нарушение  $L$ -числа может быть вызвано взаимодействиями с гипотетич. частицами — *Xиггса бозонами* (Н), т. е. юклавскими связями.

Взаимодействия Н. разных типов универсальны: нейтринные токи с  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  имеют одинаковую  $(V - A)$ -структуру и одинаковые константы связи. Наблюдаемые различия в характеристиках процессов с участием  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  сводятся к разнице в массах частиц.

Кроме  $\nu_e, \nu_\mu$  и  $\nu_\tau$  могут существовать т. и. с  $e^-$  и  $\mu^-$  и  $\nu_e$  Н., не обладающие обычным слабым взаимодействием, т. е. связями с промежуточными бозонами. Примером таких Н. могли бы быть правые компоненты  $\nu_e$  в теории ВГС. Взаимодействия стерильных Н. с веществом сильно подавлены. Обычные состояния могут переходить в стерильные (и наоборот) в результате осцилляций  $\nu_e \leftrightarrow (\nu_R)^c$  и/или испускания (поглощения) хиггсовых бозонов.

Число типов лёгких Н., имеющих обычные слабые взаимодействия,  $N$ , было определено в 1989—90 по измерениям параметров  $Z^0$ -бозона на  $e^+e^-$ -коллайдере (СЛАК) и гл. обр. LEP (ЦЕРН). Полная ширина  $Z^0$  зависит от  $N_\nu : \Gamma_Z = \Gamma_3 + N_\nu \Gamma_\nu$ , где  $\Gamma_3$  — вклад заряд. частиц, а  $\Gamma_\nu \equiv \Gamma(Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu})$  — вклад Н. одного типа,  $\Gamma_\nu = N_\nu \Gamma_\nu^{\text{станд.}}$  составляет т. н. невидимую ширину, поскольку Н. не взаимодействуют.  $\Gamma_\nu$  восстанавливают по измеренным  $\Gamma_3, \Gamma_3$ , а также по адронной ширине и сечению в максимум пика. По данным детекторов LEP получено  $N_\nu^{\text{станд.}} \equiv \Gamma_\nu / \Gamma_\nu^{\text{станд.}} = 2.95 \pm 0.10$  в согласии с  $N_\nu = 3$ . Т. о., новых типов Н. кроме  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  не существует.  $N_\nu$  определяется также по величине сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}$  в области  $Z^0$  резонанса (детектирование изолированного  $\nu$  — кванта);  $\sigma_\nu \sim N_\nu$ .

Среди других ограничений на  $N_\nu$  наиб. сильное даёт космология — анализ первичного нуклеосинтеза. Наблюдат. данные по распространённости  $^4\text{He}$  позволяют поставить предел:  $N_\nu < 4[8]$ .

### Взаимодействия Н.

Поскольку нейтрино электрически нейтральны и бесцветны, нейтринные процессы в низшем порядке теории возмущений обусловлены слабым взаимодействием.

Взаимодействия Н. и теория Вайнберга — Глашоу — Салама [9]. Согласно этой теории, Н. имеет калибровочные и, возможно, юклавские взаимодействия. Калибровочные взаимодействия — связи с  $W^-$  и  $Z^0$ -бозонами — фиксируются тем, что левые компоненты Н. и соответствующие заряд. лептоны образуют дублеты  $SU_2$ -группы ( $\nu_L, l_L$ ). При этом для  $\nu_e$  проекция слабого изополюсного спина  $T_3 = 1/2$  и слабый гиперзаряд  $Y = -1$ . Правые компоненты Н.  $\nu_R$  (если существуют) являются синглетами группы  $SU_2 \times U_1 : T_3(\nu_R) = Y(\nu_R) = 0$ . Нейтрино  $\nu_e$  стерильны, взаимодействий с Н. и  $Z^0$  у них нет, поэтому и зарпненные, и нейтральные (см. *Нейтральный ток*) нейтринные токи имеют  $(V - A)$ -структуру. Константы связи Н. с  $W^-$  и  $Z^0$ -бозонами равны  $g/2\sqrt{2}$  и  $g/4\cos \theta_w$ , где  $g$  — константа связи, соответствующая подгруппе  $SU_2$ , а  $\theta_w$  — *Вайнберга угол*.

Юклавские взаимодействия — связи с гипотетич. хиггсовым бозоном (возможно несколькими) предполагают существование правых компонент Н. и/или дополнит. мультплетов скалярных бозонов. Эти взаимодействия при спонтанном нарушении симметрии дают массы Н., и,

если нет случайной «игры» параметров, их константы,  $\lambda$  существенно меньше калибровочной константы  $g$ :  $\lambda \sim gm_w/m_w \ll g$ .

Взаимодействия Н. с кварками и лептонами обусловлены обменом  $W$ - и  $Z^0$ -бозонами (рис. 6).

Распады частиц с участием Н. Источники Н. Калибровочные взаимодействия Н. непосредственно проявляются в распадах  $W$ - и  $Z^0$ -бозонов:  $W \rightarrow \nu_l + l$ ,  $Z^0 \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ . Ширины распадов:

$$\Gamma_l \approx g^2 m_w / 48\pi \approx 250 \text{ МэВ},$$

$$\Gamma_{\nu} \approx g^2 m_l / 96\pi \cos^2 \theta_w \approx 167 \text{ МэВ}.$$

Регистрация заряд. лептонов и измерение т. н. недостающей энергии, уносимой Н., — один способ детектирования  $W$ . Сигналами нейтринных распадов  $Z^0$  являются т. н. монофотонные или моноэлектронные события.

Наиб. важные источники Н. в естеств. условиях и лаб. экспериментах —  $\beta$ -распады атомных ядер,  $e$ -захват в атомах, распады мюонов,  $t$ -лептонов,  $\tau$ ,  $K$ -мезонов, распады частиц, содержащих тяжёлые кварки:  $D, F, A_c, B, \dots$  и т. д. Общие свойства распадов таковы.

1) Распады обусловлены заряд. токами, поскольку в них изменяются типы (а р о м а т н) частиц, а нейтр. ток с изменением ароматов в стандартной модели отсутствуют (напр., относ. вероятность распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu} < 10^{-7}$ ). Следовательно, Н. рождаются вместе с заряд. лептонами и зафиксированы их тип ( $\nu_e, \nu_\mu$  или  $\nu_\tau$ ), а не масса в случае смешивания (см. ниже, Смешивание Н.).

2) Вероятности трёхчастичных распадов  $A \rightarrow B\gamma l$  ( $A, B, l, K$ , барий, ядро) пропорц. 5-й степени энергодивелений  $\Gamma_3 \sim G^2 Q^5$ , где  $G$  — константа Ферми ( $Q \approx m_A$  при  $m_B, m_l \ll m_A$ ). Если  $Q \gg m_l, l = e, \mu$  или  $e, \mu, \tau$ , то  $\Gamma_3$  одинаковы для Н. разных типов. У двухчастичных распадов мезонов:  $M \rightarrow l + \nu_l$  ( $M = \pi, K, D, F$ ) ширина пропорц. энергодивелению и квадрату массы заряд. лептона (последнее есть следствие спирального запрета):  $\Gamma_2 \sim G^2 m_l^2 Q$ . Двухчастичные распады, т. о., не обладают ( $\nu_e - \nu_\mu - \nu_\tau$ )-универсальностью: доминирует мода с наиб. тяжёлым (из допустимых для данного распада) лептоном и соответствующим Н. У лёгких мезонов это  $l^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ . При переходе к более тяжёлым мезонам ( $D, F, B$ ) преобладающим становится трёхчастичный распад ( $\Gamma_3/\Gamma_2 \sim Q^4$ ) и универсальность  $\nu_e - \nu_\mu$ , а затем  $\nu_e - \nu_\mu - \nu_\tau$  восстанавливается.

Расcеяние Н. Нейтрино могут рассеиваться (и поглощаться) на электронах, нуклонах и ядрах:

$$\nu_l + l \rightarrow l + X, \quad (13)$$

где  $l$  — частицы мишени ( $l = e, N$ , ядро),  $l_1 = \nu_l, l$ , а  $X$  — одна или неск. частиц в конечном состоянии. При энергиях соударения в системе центра инерции ( $\sqrt{s}$ ), много меньших порога рождения  $W$  и  $Z^0$ ,  $\sqrt{s} \ll m_W$ , взаимодействия Н. с кварками и лептонами имеют точечный четырёхфермионный характер. Вследствие этого сечения растут пропорц. квадрату полной энергии

$$\sigma \sim \frac{G^4 (s - m_l^2)^2}{\pi s} \approx \frac{G^2 s}{\pi}, \quad (14)$$

$m_l$  — масса мишени. [В (14) и дальше  $\sigma$  выписывается с точностью до числ. факторов, определяемых теорией ВГС.]

В лаб. системе отсчёта (в к-рой  $l$  покоится) из (14) следуют две разные зависимости от энергии:

$$\sigma \sim \begin{cases} \frac{4G^2 s^2}{\pi}, & \nu_e \ll m_l \\ \frac{2G^2 m_l^2 \nu_e}{\pi}, & \nu_e \gg m_l \end{cases} \quad (15)$$

т. е. при энергиях Н. больше массы мишени квадратичный рост сменится линейным. В области  $\nu_e \ll m_l$  сечения не зависят от массы мишени. В частности, они одного порядка для  $\nu$ -рассеяния на электроне и на нуклоне. При  $\nu_e > m_l$  сечения пропорциональны массе мишени ( $\sigma(\nu p)/\sigma(\nu e) \sim m_p/m_e \approx 2000$ ) (рис. 7).

При  $\sqrt{s} > m_W$  в рассеянии Н. проявляется структура лаб. взаимодействия, связанная с обменом  $W$ - и  $Z$ -бозонами, его уже нельзя считать происходящим в одной точке, и зависимость сечений от энергии изменяется. Для процессов рассеяния Н. на точечных объектах (электронах, кварках) с  $W$ -обменом в  $t$ -канале (см. рис. 6)  $\sigma \sim G^2 m_w^4 / \pi (1 + m_w^2/s)$ . При  $s \approx m_w^2$  сечения прекращают линейный рост с увеличением  $s$  и затем выходят на константу:  $\sigma \rightarrow \sigma_0 \sim G^2 m_w^4 / \pi \approx 10^{-34} \text{ см}^2$  (в нашем порядке теории возмущений) [рис. 8, кривая  $\nu_e e$ ]. Сечения  $\nu$ -рассеяния с  $W$ - или  $Z$ -обменом в  $u$ -канале (канале (в  $s$ -канале, напр.  $\bar{\nu}_0 + e \rightarrow \nu' + e \rightarrow \bar{\nu}_0 + \mu$ ), имеют резонансный характер (резонанс Глэшоу; рис. 8, штриховая кривая).

Взаимодействие Н. с нуклонами (рис. 8, кривая  $\nu N$ ) есть суммарный эффект рассеяния Н. на отд. кварках, составляющих этн нуклоны. При  $\nu_e < \text{неск.}$

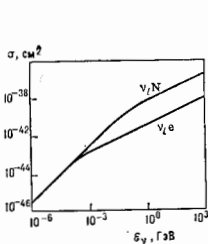


Рис. 7. Зависимости сечений рассеяния нейтрино на нуклонах и электронах от энергии  $\nu_e$  при  $2m_l \nu_e \ll m_w^2$ .

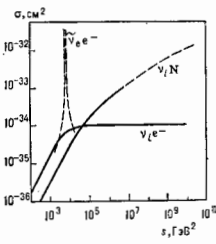


Рис. 8. Зависимости сечений рассеяния нейтрино и антинейтрино на электронах и нейтрино на нуклонах при  $s \approx m_w^2$  (теоретически кривые).

сотен МэВ происходит уруговое и квазиуруговое рассеяние:  $\nu_0 + p \rightarrow \nu_0 + p, \nu_0 + n \rightarrow \mu^- + p$  и т. д. С повышением энергии дополнит. вклад даёт сначала однократное рождение ( $\nu_0 + p \rightarrow \mu^- + \nu' + p$ ), а затем рождение большего числа адронов. В области неск.  $\Gamma \text{эВ} < \nu_e \leq 100 \text{ мэВ}/m_w$  ( $s \leq 10 \text{ мэВ}^2$ ) доминируют *главн.о. нейтрные процессы* [9, 10]. Вклады от рассеяния  $\nu$  на отдельных кварках в сечениях этих процессов суммируются некогерентно. При  $s \ll m_w^2$  сечение  $\sigma \approx (G^2 s / \pi) \xi$ , где  $\xi = 0,2 - 0,3$  — доля полного импульса нуклона, которую несут кварки, взаимодействующие с Н. Сечения растут пропорц.  $s$ , отклонение от линейного роста вследствие нарушения скейлинга Бёркена (см. Масштабная инвариантность) в *квантовой хромодинамике* незначительно. При  $s \approx m_w^2$  рост сечений  $\nu N$ -взаимодействия замедляется, но, в отличие

от рассеяния на точечной частице, не прекратится и будет сравнительно быстрым (быстрее, чем  $\ln^2 s/m_w^2$ ), что обусловлено рассеянием  $\nu$  на морских кварках. При  $s \approx 100 m_w^2$  заметный и возрастающий с  $s$  вклад дают т. в. полужесткие и мягкие соударения. Для них характерны эффекты экранировки партонов (кварков и глюонов), коллективные испускания глюонов и т. д. Не исключено, что быстрый (быстрее  $\ln^2 s/m_w^2$ ) рост  $\sigma$  для  $[s \approx (10^8 - 10^6) m_w^2]$  продолжается до значений, равных геом. размеру нуклона с учётом непрозрачности:  $\sigma \sim R_N^2 \alpha_w^2 \approx (10^{-30} - 10^{-28}) \text{ см}^2$  ( $R_N$  — радиус нуклона,  $\alpha_w^2 = g^2/4\pi$ ).

Сечения взаимодействия Н. и антинейтрино даже на неполяризов. мишенях не равны. Причина этого — нарушение чётности в слабом взаимодействии и поляризация самих Н. В области  $m_r^2 \ll s \ll m_w^2$  отношение сечений, обусловленных  $(V - A)$ -токами:  $\sigma_{\nu_e, A} / \sigma_{\bar{\nu}_e, A} = 1/3$ . Различие  $\sigma_{\nu}^{\nu}$  и  $\sigma_{\bar{\nu}}^{\nu}$  связано с величиной полного спина  $J$  сталкивающихся частиц и, следовательно, с угл. распределением рождаемых лептонов. Напр., для  $\nu_e l$ -рассеяния  $J = 0$  и распределение в системе центра инерции изотропно, для  $\nu_e l$ -рассеяния  $J = 1$  и рассеяние происходит преим. вперёд. Величины  $\sigma_{\nu}^{\nu}$  и  $\sigma_{\bar{\nu}}^{\nu}$  сравниваются при сверхвысоких энергиях:  $s \gg m_w^2$ , где вклад в сечения дают волны с ненулевыми орбит. моментами.

Нейтринные эксперименты. 1) Рассеяние  $\bar{\nu}_e$  в области низких энергий,  $\bar{\nu}_e \ll 10 \text{ МаВ}$ , исследуется в экспериментах на ядерных реакторах [11]. Источником  $\bar{\nu}_e$  являются цепочки  $\beta$ -распадов осколков деления ядер  $^{235}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и др. В среднем на одно деление приходится  $6\nu_e$ , и при мощности реактора 3000 МВт полный поток  $\nu_e$  составляет  $5 \cdot 10^{20} \text{ с}^{-1}$ . Спектры Н. быстро падающие, с характерным диапазоном  $\bar{\nu}_e = (1-8) \text{ МэВ}$ . Для детектирования Н. используется г. обр. обратный  $\beta$ -распад [2]. Мишени-детекторы представляют собой баки с жидкими водородосодержащими сцинтилляторами, к-рые (в ряде установок) просвечены гелиевыми проволоочными камерами для регистрации нейтронов. Кроме измерений спектров  $e^+$  на разных расстояниях от реактора (см. ниже, Осцилляции Н.) изучаются взаимодействия  $\bar{\nu}_e$  с электронами и дейтронами (напр.,  $\bar{\nu}_e + d \rightarrow e^+ + n + n$ ).

Интенсивные потоки Н. создаются мощными радиоактивными источниками ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{N}$  и др.). Эксперименты с такими источниками, окружёнными защитой, через к-рую могут проникнуть только Н., проводятся как для изучения взаимодействий Н. при низких энергиях, так и для калибровки нейтринных детекторов, в частности радиохим. детекторов солнечных Н.

Развиваются новые методы детектирования низкоэнергетич. Н., основанные на низкотемпературных болометрах, измеренных в кристаллах, регистрации возмущений в сверхтекучем гелии, фазовых переходах в перегретых сверхпроводящих гранулах и др.

2) При больших энергиях, вплоть до  $\bar{\nu}_e \approx 300 \text{ МэВ}$ ,  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$ -рассеяние исследуют на мезонных фабриках. Нейтринные потоки возникают здесь в цепочке распадов  $l^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_e$ ,  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_e$ , а сами  $l^+$  генерируются во взаимодействиях ускоренных до 500—800 МэВ протонов с ядрами мишени.

3) Рост сечений взаимодействия Н. с увеличением энергии и связанная с этим возможность проведения нейтринных экспериментов на ускорителях высоких энергий обсуждался М. А. Марковым в 1957. Первые нейтринные эксперименты на ускорителях были осуществлены в 1962 в Брукхейвене и в 1964 в ЦЕРНе [12]. В 1973 на ускорителе ЦЕРНа в нейтринных экс-

периментах были открыты слабые нейтральные токи, что сыграло важную роль в становлении совр. теории электрослабого взаимодействия.

Существуют две разные постановки эксперимента: обычная — с Н. от  $\pi^-$ , К-распадов и «сброс пучка» на толстую мишень, позволяющую изучать «прямые» Н. В первом случае нейтринный пучок формируется в распадах  $\pi^-$  и К-мезонов, родившихся во взаимодействиях ускоренных протонов с достаточно тонкой мишенью. Необходимым элементом в такой постановке эксперимента является распадный канал (для осуществления распадов  $\pi^-$  и К). При  $\bar{\nu}_e \approx 200 \text{ ГэВ}$ , напр., его длина равна ок. 300 м. Между распадным каналом и детекторами Н. расположен мюонный фильтр — слой железа, а также слой грунта, в к-рых поглощаются все частицы, за исключением Н.

В эксперименте по сбросу пучка ускоренные протоны падают на металл. мишень толщиной до 2 м и в к-рой, не успевая распасться, поглощаются осн. часть  $\pi^-$  и К-мезонов и, т. о., поток обычных распадных Н. оказывается сильно подавленным. На его фоне становятся заметны Н., родившиеся в распадах тяжёлых короткоживущих D, F и др. мезонов, у к-рых распад превалирует над поглощением. Практически такие Н. возникают в точке первичного взаимодействия протонов, и их называют «прямыми». Распадный канал при сбросе пучка не нужен. В качестве мишени-детекторов в ускорит. экспериментах используют большие пузырьковые камеры, а также калориметры, к-рые состоят из пластин железа или мрамора, просвеченных сцинтилляц. счётчиками, дрейфовыми трубками, проволоочными камерами и т. д. Детекторы дополняются иногда мюонными спектрометрами.

4) В экспериментах на подземных установках источником Н. является атмосфера Земли — распады частиц, родившихся во взаимодействиях космич. лучей с ядрами атмосферы (Марков, 1960). Взаимодействие Н. низких энергий,  $\bar{\nu}_e \lesssim$  сотни МэВ — неск. ГэВ, регистрируются большими водными черенковскими детекторами (IMB, KAMIOKANDE), а также топочеструктурными электронными установками (FREJUS, NUSEX). Причём треки частиц, рождаемых в нейтринном взаимодействии, могут полностью уместиться в детекторе («включённые события»). Такие события являются осн. фоном для поиска распада протона и  $\nu$   $\rightarrow$   $e^+$  осцилляции. При более высоких энергиях Н.,  $\bar{\nu}_e \gtrsim 10 \text{ ГэВ}$ , осн. часть регистрируемых событий — мюоны, пересекающие детектор. Они рождаются атмосферными Н. в грунте nearby установок. Преимуществом обладают детекторы, способные определять направление прихода мюона (Баксанский нейтринный телескоп).

Особый интерес представляют события, когда Н. приходит из нижней полусферы Земли: в этом случае расстояние источник — детектор равно  $2R_{\oplus}$ .

5) Взаимодействия Н. сверхвысоких энергий,  $\bar{\nu}_e > 1 \text{ ТэВ}$ , предполагается изучать на глубоководных установках (Марков, 1960). Источниками Н. являются космос (космич. Н.) и атмосфера Земли. Детекторы представляют собой большие объёмы воды на значит. глубине в океане или озере, просматриваемые черенковскими счётчиками или прослушиваемые акустич. детекторами (проект «Байкал», ДЮМАНД). Развивается методика регистрации радиолацеляционных ядерных и эл.-магн. каскадов, вызванных Н. в большом объёме льда (напр., в Антарктиде).

Информация о взаимодействиях Н. с энергиями вплоть до  $10^{20} \text{ эВ}$  может быть получена из исследований широких атм. линий, развивающихся под большими углами к вертикали (установка «Мушиньи глаза», Канада).

Результаты нейтринных экспериментов находятся в хорошем согласии с предсказаниями теории ВГС. В частности, для упругого рассеяния  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$  на электронах при энергии  $\bar{\nu}_e > 1 \text{ ГэВ}$ , получено:

$$\sigma(\nu_e e^-)/\sigma\nu = (1,9 \pm 0,4 \pm 0,04) \cdot 10^{-42} \text{см}^2/\text{ГэВ},$$

$$\sigma(\bar{\nu}_e e^-)/\sigma\nu = (1,5 \pm 0,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-42} \text{см}^2/\text{ГэВ},$$

где первая из указанных ошибок — статистическая, а вторая — систематическая. В теории ВГС при  $\sin^2 \theta_w = 0,22$  соотношения между сечениями для др. типов  $\nu$  следующие:

$$\sigma(\nu_e e^-) : \sigma(\bar{\nu}_e e^-) : \sigma(\nu_e e) \approx 5,9 : 2,4 : 4.$$

Сечения глубоко неупругого рассеяния  $N$  ( $E_\nu > 10 \text{ ГэВ}$ ) на мишени (ядре), содержащей равное число протонов и нейтронов, в расчёте на один нуклон равны:

$$\sigma(\nu_e N \rightarrow \mu^- X)/\sigma\nu = 0,62(2) \cdot 10^{-38} \text{см}^2/\text{ГэВ},$$

$$\sigma(\bar{\nu}_e N \rightarrow \mu^+ X)/\sigma\nu = 0,30(2) \cdot 10^{-38} \text{см}^2/\text{ГэВ}.$$

Отношение сечений нейтральных токов к сечениям заряд. токов

$$R_\nu \equiv \sigma(\nu_e N \rightarrow \nu_e X)/\sigma(\nu_e N \rightarrow \mu^- X) = 0,309(3),$$

$$R\bar{\nu} \equiv \sigma(\bar{\nu}_e N \rightarrow \bar{\nu}_e X)/\sigma(\bar{\nu}_e N \rightarrow \mu^+ X) = 0,390(14).$$

Электромагнитные свойства  $N$ . Взаимодействие  $N$  с эл.-магн. полем обусловлено либо радиационными поправками ( $N$  переходит в виртуальное состояние, содержащее заряд. частицу, напр.  $I^+ + W^-$ ), либо вольтовой составной структурой самих  $N$ . Т. о., у  $N$  возникает магн. момент ( $\mu_N$ ) и распределение электр. заряда, характеризуемое эл.-магн. радиусом ( $r_{\text{эм}}$ ).

Отражение на  $\mu_N$  следует из данных по  $\nu e^-$  рассеянию при низких энергиях. Дополнит. вклад в сечение этого процесса,  $k$ -рый мог бы быть обусловлен обменом фотоном, взаимодействующим с  $\mu_N$ , не обнаружен. Отсюда получено:  $\mu(\nu_e) \leq 2 \cdot 10^{-14} \mu_B$  (рассеяние реакторных  $N$ ) и  $\mu(\nu_e) \leq 10^{-12} \mu_B$  ( $\nu_e$  от ускорителей), где  $\mu_B$  — магнетон Бора. Астрофиз. и космологич. ограничения оказываются более строгими. Эл.-магн. взаимодействие  $N$ : 1) приводит к быстрому остыванию белых карликов; отсюда  $\mu_N < (0,8 - 1,0) \cdot 10^{-11} \mu_B$  для всех типов  $N$ ; с  $m \leq 1 \text{ кэВ}$ ; 2) влияет на первичный нуклеосинтез, и это даёт  $\mu_N < 0,5 \cdot 10^{-10} \mu_B$ ; 3) приводит к генерации потоков высокоэнергичных  $N$ . от гравит. коллапсов — из данных по SN 1987A  $\mu_N < (10^{-12} - 10^{-13}) \mu_B$ . Данные по солнечным  $N$  позволяют исследовать диапазон  $\mu_N$  до  $\approx 10^{-12} \mu_B$ .

В теории ВГС дираковские  $N$  имеют магн. момент, пропорц. массе  $N$ :

$$\mu_N = 3eGm_N/8\sqrt{2}m^2 = 10^{-19} (m_N/1 \text{ эВ}) \mu_B.$$

С учётом существующих ограничений на  $m_N$  предсказания  $\mu_N$  оказываются значительно меньше верхних экспериментальных пределов. В моделях, содержащих правые заряд. токи и/или заряд. хиггсовские бозоны,  $\mu_N$  пропорц. массе заряд. лептона и может оказаться на 4–5 порядков больше. У майорановских  $N$   $\mu_N = 0$ , но в этом случае возможен т. н. недираковские, или переходные, магн. моменты, для  $k$ -рых начально и конечное нейтринные состояния соответствуют разным майорановским частицам. Для эл.-магн. радиуса  $N$  в теории ВГС предсказывается

$$\langle r_{\text{эм}} \rangle \approx g^2/16\lambda^2 \cdot m^{-2} \ln(m_w^2/m_i^2) \approx \text{неск. ед.} \cdot 10^{-33} \text{ см}^2.$$

Взаимодействия  $N$  вне рамок теории Вайнберга — Гэллоу — Салама.  $N$  могут иметь дополнит. взаимодействия с новыми пока гипотетич. частицами, в т. ч. с правыми заряд. бозонами  $W_R$ , переводящими правые компоненты  $\nu_R$  в  $I_R$ , со скалярными бозонами ( $H$ ) как нейтральными, так и заряженными, причём константы связи  $\lambda$  с  $H$  не обязательно подавлены фактором  $m_i/m_w$ . Не исключено существование скалярных нейтральных безмассовых (или очень лёгких) частиц, взаимодействующих преим. с  $N$ . (возможности существования бозонов, т. н.

майоронов). Все эти взаимодействия  $N$  экспериментально пока не обнаружены.

Класс новых взаимодействий возникает в связи с дальнейшим развитием идеи объединения частиц и взаимодействий. В суперсимметричных моделях у  $N$  появляются связи типа  $(g/\sqrt{2})\nu_e \tilde{W}$ ,  $(g/2)\nu_e \tilde{Z}$ , где  $\nu_e$ ,  $\tilde{W}$ ,  $\tilde{Z}$  — соответственно суперсимметричные скалярные партнёры электрона и  $H$ . (т. н. салектроны и снейтрино) и суперсимметричные спиновые партнёры  $W$ - и  $Z$ -бозонов (т. н. виво и зино; см. *Суперсимметрия*). В моделях великого объединения  $N$  образуют единые мультиплеты с кварками, что отражает общую природу этих частиц. У  $N$  при этом возникают калибровочные и юкавские взаимодействия со сверхтяжёлыми бозонами  $Y^{1/6}$ ,  $H^{1/6}$ , напр.  $(g/\sqrt{2})\tilde{d}^{c*}\nu_e Y_{\tilde{d}^c}$  (где  $\tilde{d}^c$  — зарядово-сопряжённое кварку  $d$  состояние,  $\tilde{Y}^c$ ,  $\mu = 0,1,2,3$  — Дирака матрицы). Эти взаимодействия нарушают сохранение барионного числа, приводя к распадам протона, в частности с испусканием  $N$ :  $p \rightarrow \nu^+ \pi^+$ . Нейтринные моды  $p \rightarrow \nu^+ K^+$  доминируют в суперсимметричных обобщениях моделей великого объединения.

### Смешивание и массы $N$ .

В предположении о существовании масс у  $N$  и о смешивании  $N$  предполагаются  $\nu$ -осцилляции, распады  $N$  и др. Эксперим. поиски этих эффектов являются методами поиска масс и смешивания  $N$ .

Смешивание  $N$ . Собств. состояния гамилтониана слабого взаимодействия  $| \nu_{eL} \rangle$ ,  $| \nu_{\mu L} \rangle$ ,  $| \nu_{\tau L} \rangle$  (и также стерильные состояния  $| \nu_{eR} \rangle$ ,  $| \nu_{\mu R} \rangle$ ,  $| \nu_{\tau R} \rangle$ ) могут быть когерентными комбинациями (смесями) неск. состояний с опред. массами  $| \nu_1 \rangle$ ,  $| \nu_2 \rangle$  ... При этом массы самих  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  и т. д. не определены. В простейшем случае смешивания двух  $N$   $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ :

$$\begin{aligned} | \nu_e \rangle &= | \nu_1 \rangle \cos \theta + | \nu_2 \rangle \sin \theta, \\ | \nu_\mu \rangle &= | \nu_2 \rangle \cos \theta - | \nu_1 \rangle \sin \theta, \end{aligned}$$

где  $\theta$  — т. н. угол смешивания; т. е.  $| \nu_1 \rangle$  и  $| \nu_2 \rangle$  смешиваются, если они являются ортогональными комбинациями одних и тех же состояний  $| \nu_L \rangle$  и  $| \nu_R \rangle$ . Смешивание обусловлено недираковскими членами лагранжиана  $m \nu_e \nu_\mu + \text{э. с.}$ , переводящими  $\nu_e$  в  $\nu_\mu$  и наоборот. При этом нарушаются лептонные числа, соответствующие  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ . Если  $N$  массивны, то их смешивание вполне вероятно, во-первых, в силу кварк-лептонной симметрии и наличия смешивания у кварков (дополнит. аргумент при этом дают модели великого объединения), во-вторых, из-за отсутствия локальной симметрии,  $k$ -рая могла бы быть ответственной за сохранение лептонного числа. Смешивание и величины масс связаны между собой. Поскольку у  $N$  допускаются майорановские массовые члены и кроме этого справедливо неравенство (9) [тогда как у кварков  $m(i) \approx m(d)$ ], смешивание лептонов и кварков может оказаться различным.

Смешивание  $N$  и распады с участием  $N$ . Смешивание означает, что в конкретном распаде вместе с одним и тем же лептоном должны рождаться  $N$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , имеющие равные массы  $m_i$ ,  $i = 1, 2$ . Для двухчастичных распадов следствием этого являются дополнит. пики в распределениях по импульсам лептонов, напр. мною на в распадах  $l \rightarrow \mu \nu_i$  или  $K \rightarrow \mu \nu_i$ . У трёхчастичных распадов ( $^{26}\text{S} \rightarrow ^{26}\text{Cl} + e^- + \bar{\nu}_e$  и др.) смешивание приводит к появлению изгибов (или скачков) на кривых Кёрри. Положение скачка определяется энергией  $\epsilon_e \approx Q - m_i$ , а его высота пропорц. величине смешивания (точнее,  $\tan^2 \theta$ ). Отрицат. результаты поисков таких пиков и скачков дают ограничения сверху на параметры смешивания в зависимости от  $m_i$ .

Осцилляции  $N$ . [13]. Осцилляциями  $N$  наз. процесс периодич. изменения свойств нейтринного луча — превращения одного типа  $N$  в другой (другие). Гипо-

теза об осцилляциях Н. была выдвинута в 1957 Пентонорво в связи с возможностью несохранения лептонного числа и по аналогии с осцилляциями  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  (см. К-мезоны, Осцилляции элементарных частиц). В ультрарелятивистском пределе длина осцилляций — расстояние, на к-ром Н. возвращается в исходное состояние, равна:  $L_0 = 4\ell\sigma^2/\Delta m^2$ , где  $\Delta m^2 = m^2 - m_s^2$ . Глубина осцилляций  $a = \sin^2 2\theta$ , вероятность осцилляций, перехода  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  на расстоянии  $x$  от источника  $\nu_e$ :  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2(\pi x/L_0)$ ; среднее значение вероятности:  $\bar{P} = 1/2 \sin^2 2\theta$ .

Выделяют два осн. типа осцилляций — осцилляции по аромату:  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ ,  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$ ,  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$  и осцилляции в стерильные состояния (осцилляции  $\nu \leftrightarrow \bar{\nu}$ ). В первом случае с расстоянием изменяются взаимодействия пучка Н., обусловленные заряд. токами, и не меняются, согласно теории ВГС, взаимодействия, обусловленные нейтральными токами. Напр., исходный  $\nu_e$ -пучок в процессе распространения будет рождать  $\mu$  или  $\tau$  и т. д. Во втором случае подавляются оба типа взаимодействий.

Поиски осцилляций осуществляются в экспериментах на «исчезновение» и на «появление». Измеряется полное число и спектр заряд. лептонов, рождаемых пучком Н. на разных расстояниях от источника. В первом случае (на «исчезновение») — это лептоны того же типа  $l_i$  что и исходные Н.  $\nu_i$ , т. е. ведётся поиск ослабления  $\nu_i$ -потока. Во втором случае — это лептоны, не соответствующие типу исходного Н. Результаты экспериментов носят отрицат. характер, и это означает в предельных случаях малость либо величины угла смешивания, при к-рой глубина осцилляций меньше чувствительности установки ( $\Delta m^2$  — любая), либо  $-\Delta m^2$  ( $\theta$  — любой), когда  $L_0$  много больше расстояния источник — детектор и осцилляции не успевают развиться. Область исключённых значений  $\sin^2(2\theta)$  и  $\Delta m^2$  характеризуется  $\sin^2(2\theta_{gr})$  — верхней границей для  $\Delta m^2$  при больших  $\Delta m^2$  и  $\Delta m^2$  — верхней границей для  $\Delta m^2$  при макс. смешивании ( $\theta = 45^\circ$ ). Реакторные эксперименты дают для осцилляций  $\bar{\nu}_e \leftrightarrow \bar{\nu}_x$ , где  $\nu_x = \nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$  или стерильное состояние  $\sin^2 2\theta_{gr} = 0,16$ ,  $\Delta m^2 = 0,008 \text{ эВ}^2$ . В экспериментах на ускорителях для осцилляций  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  получают соответственно значения  $3 \cdot 10^{-3}$  и  $0,1 \text{ эВ}^2$ ; для  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$ :  $4 \cdot 10^{-3}$  и  $0,9 \text{ эВ}^2$ . Подземные эксперименты (Банксанский нейтринный телескоп, детектор IMB, США) для моды  $\bar{\nu}_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$  дали  $\sin^2 2\theta_{gr} = 0,6$ ,  $\Delta m^2 = 10^{-3} \text{ эВ}^2$ . Кроме того, исключается область параметров  $\Delta m^2 = (0,3-3) \cdot 10^{-4} \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta \geq 0,3$ .

Результаты экспериментов с солнечными Н. содержат указания на осцилляции  $\nu_e \rightarrow \nu_x$ , где  $\nu_x = \nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$  или стерильное Н. Эксперименты чувствительны к  $\Delta m^2 \geq 10^{-12} \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta \geq 0,1$ ; с учётом резонансной конверсии нейтрино они становятся чувствительными к существенно меньшим значениям  $\sin^2 2\theta$ , вплоть до  $10^{-3}-10^{-4}$  в диапазоне  $\Delta m^2 = (10^{-8}-10^{-4}) \text{ эВ}^2$ . Регистратор Н. от гравитацион. коллассов позволяет исследовать ещё больший диапазон  $\Delta m^2 = (10^{-8}-10^{-4}) \text{ эВ}^2$ .

Распад Н. Если  $m(\nu) \neq 0$ , то, вероятно, все Н., кроме самого лёгкого, нестабильны. Допустимые след. моды распада.

a)  $\nu_2 \rightarrow \nu_1 + e^+ + e^-$ . Н.  $\nu_2$  с массой  $m_2 > 2m_0$  может рождаться [при учёте ограничений на  $m(\nu)$ ],  $l = e, \mu, \tau$  либо как осн. составляющая  $\nu_e$ , либо как малая примесь в  $\nu_e, \nu_\mu$ . Вероятность распада в единицу времени:

$$\Gamma = \Gamma_0 |u_{e2}|^2, \text{ где } \Gamma_0 = G^2 m_2^5 / 192\pi^3.$$

Эксперим. поиски распада на реакторе и ускорителях дают ограничение на параметр смешивания  $|u_{e2}|^2 \leq 10^{-9}$  в диапазоне масс (2-8) МэВ. Более строгие ограничения следуют из космологии и астрофизики.

б) Радиаци. распад  $\nu_2 \rightarrow \nu_1 + \gamma$  в теории ВГС его вероятность также пропорц.  $m_2$  в 5-й степени:

$$\Gamma \approx \Gamma_0 (m_2)^5 \frac{27\alpha}{32\pi} \left(\frac{m_1}{m_W}\right)^4 |u_{21}|^2, \quad (16)$$

$u_{21}$  — параметр смешивания,  $m_W$  и  $m_1$  — массы W-бозона и заряд. лептона  $l$ . В модифициров. моделях с правыми нейтр. токами и др.  $\Gamma$ , пропорц.  $m_2^5$  и может оказаться значительно большей, чем в (16). Поиски радиаци. распада в реакторных экспериментах позволили поставить нижний предел:  $\tau/m_2 \geq 20 \text{ с/эВ}$  ( $\tau$  — время жизни Н.). Наиб. сильные ограничения дают астрофизика и космология. В частности, из наблюдений сверхновой 1987А получена величина отношения  $\tau/m_2 \geq 8 \cdot 10^{14} \text{ с/эВ}$ . Измерения спектра реликтовых фотонов, к-рым мог бы быть искажён  $\gamma$ -квантами от распада  $\nu_2$ , чувствительны к величине  $\sigma^2/m_2$ , превышающим возраст Вселенной ( $\sigma^2$  — энергия Н.).

в) Распад  $\nu_2 \rightarrow \nu_1 \gamma \gamma$  может быть значительно быстрее предыдущего: его вероятность не содержит фактора  $(m_1/m_W)^4$ . Для этого распада справедливы те же ограничения, что и для одифотонного.

Кроме обсуждавшихся выше т. н. обнаруживаемых распадов, могут быть «невидимые» распады:  $\Gamma: \nu_2 \rightarrow \nu_1 + \bar{\nu}_1 + \nu_1 + \Gamma \sim \Gamma; d) \nu_2 \rightarrow \nu_1 + \phi$ , где  $\phi$  — лёгкая или безмассовая скалярная частица (напр., майорон). Этот распад может оказаться наиб. быстрым ( $\Gamma \sim h^2 m_2^3 / 16l$ , где  $h$  — константа связи Н. с  $\phi$ ), и устраняет космологич. ограничение (11) на массы Н.

О спектре масс Н. Возможное объяснение малости масс Н. по сравнению с массами заряд. частиц из соответствующих поколений фермионов предložили М. Гелл-Манн (М. Gell-Mann), П. Рамон (P. Ramond), Р. Слэнский (R. Slansky) и Т. Янагидза (T. Yanagida) в 1980. Неравенство (9) объясняется тем, что Н. — единств. частица из поколения фермионов, у к-рой все сохраняющиеся заряды равны нулю:  $Q_T = Q_C = 0$ , поэтому только Н. может иметь кроме дираковской массы майорановские массовые члены. На основании этого было получено соотношение:  $m(\nu_i) = m_D^i / m_A$ , где  $m_D$  — типичная дираковская масса для данного поколения фермионов,  $m_A$  — майорановская масса правой компоненты Н., и, раз м.м. больше  $m_D$  и, возможно, соизмерима с наиб. масштабом масс в теории, напр. с масштабом великого объединения.

Существование конечных масс у Н. в конкретных калибровочных теориях, за исключением мнн. вариантов  $SU_{2+U}(1)$  и  $SU_3$ , представляется практически неизбежным.

Лит.: 1) Па у и В. К старой и новой истории нейтрино, пер. с нем., в кн.: Теоретическая физика XX в., М., 1982; 2) Гонтерков Б. М., Странины развития нейтринной физики, «УФН», 1983, т. 141, с. 675; 3) Аля х а н о в А. И., Слабые взаимодействия, М.: Наука, 1982; 4) М а р т о н о в М. А., 1960; 4) Л е н д ж. Нейтрино, пер. с англ., М., 1960; 5) Р и ч е р с С. о в а С. L. Jr., Detection of the free neutrino, «Phys. Rev.», 1953, v. 92, p. 836; Р е а д е н с Ф. Коуэн Р. К. Л., Нейтрино, пер. с англ., «УФН», 1957, т. 62, с. 391; 4) М а р т о н о в М. А., Нейтрино, М., 1964; 5) Д а л ь б у Г. Observation of high energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos, «Phys. Rev. Lett.», 1962, v. 9, p. 36; Ф е й н б е р г Д. Ж., Л е н д ж. и К о м. М., Массы и мюонное нейтрино, в кн.: Нейтрино, пер. с англ., М., 1970; 6) Р е н г М. L., Properties of anomalous ea events produced in  $e^+e^-$  annihilation, «Phys. Lett.», 1976, v. 83B, p. 466; А з и м о в Е. С., Ф р а н к ф у р т Л. Л., К о з ь в А., Новая частица в е<sup>+</sup>e<sup>-</sup> аннигиляции типичный лептон  $\nu_e$ , «УФН», 1978, т. 124, с. 45; 7) К о з ь в Б. С. и др., Об оценке масс  $\nu_e$  по спектру  $\beta$ -распада трития в вакууме, пер. с англ., «Ядерная физика», 1980, т. 32, с. 301; 8) Герштейн С. С., Зельдович Я. Б., Массы нулевого мюонного нейтрино и космология, «Письма в ЖЭТФ», 1966, т. 4, с. 174; 3) З е л ь о в И. В., Х л о п о в М. Ю., Массы нейтрино в физике элементарных частиц и космологии ранней Вселенной, «УФН», 1981, т. 135, с. 45; 9) О к у н И. Л. Б., Лептоны и кварки, 2 изд., М., 1980; 10) Б л е ж к и н Я. С. М., Ленин по физике нейтринных и лептон-числовых процессов, М., 1981; 11) Б о р о в о в А. А., Нейтринные эксперименты на реакторах, «ЭЧАЯ», 1980, т. 11, с. 92; 12) Е р м о л о в Л. Ф., М у х и н А. И., Нейтринные эксперименты при высоких энергиях, «УФН», 1978, т. 124, с. 385; 13) Б и л е н к о И. И., П о л о в и н о в В. М., Смешивание лептонов и осцилляции нейтрино,

УФН, 1977, т. 423, с. 181; Vilenky S.M., Petcov S. T., Massive neutrinos and neutrino oscillations, *Sov. Mod. Phys.*, 1987, т. 59, p. 671. Г. Т. Зацепин, А. Ю. Смирнов. НЕЙТРОН ( $n$ ) (от лат. neuter — ни тот, ни другой) — элементарная частица с нулевым электрич. зарядом и массой, незначительно большей массы протона. Наряду с протоном под общим назв. нуклонов входит в состав атомных ядер. Н. имеет спин  $1/2$  и, следовательно, подчиняется Ферми — Дирака статистике (является фермионом). Принадлежит к семейству адронов; обладает барьонным числом  $B = 1$ , т. е. входит в группу барьонов.

Открыт в 1932 Дж. Чедвиком (J. Chadwick), показавшим, что жесткое проникающее излучение, возникающее при бомбардировке ядер бериллия  $\alpha$ -частицами, состоит из электрически нейтральных частиц с массой, примерно равной протону. В 1932 Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберг (W. Heisenberg) выдвинули гипотезу о том, что атомные ядра состоят из протонов и Н. В отличие от зарядк. частиц, Н. легко проникает в ядра при любой энергии и с большой вероятностью вызывает ядерные реакции захвата ( $n, \alpha$ ), ( $n, \beta$ ), ( $n, p$ ), если баланс энергии в реакции положительный. Вероятность эвентризм. ядерной реакции увеличивается при замедлении Н. обратно пропорц. его скорости. Увеличение вероятности реакций захвата Н. при их замедлении в водородсодержащих средах было обнаружено Э. Ферми (E. Fermi) с сотрудниками в 1934. Способность Н. вызывать деление тяжёлых ядер, открытая О. Ганом (O. Hahn) и Ф. Штрассманом (F. Strassman) в 1938 (см. Деление ядер), послужила основой для создания ядерного оружия и ядерной энергетики. Своеобразие взаимодействия с веществом медленных Н., имеющих де-Бройлевскую длину волны порядка атомных расстояний (резонансные эффекты, дифракция и т. д.), служит основой широкого использования нейтронов пучков в физике твёрдого тела. (Классификация Н. по энергиям — быстрые, медленные, тепловые, холодные, ультрахолодные — см. в ст. Нейтронная физика.)

В свободном состоянии Н. нестабилен — испытывает  $\beta$ -распад;  $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$ ; его время жизни  $\tau_n = 898(14)$  с. (грабичная энергия спектра электронов 782 кэВ (см. Бета-распад нейтрона)). В связанном состоянии в составе стабильных ядер Н. стабилен (по экстрем. оценкам, его время жизни превышает  $10^{22}$  лет). По астр. оценкам, 15% видимого вещества Вселенной представлено Н., входящими в состав ядер  $^4\text{He}$ . Н. является осн. компонентой нейтронных звезд. Свободные Н. в природе образуются в ядерных реакциях, вызываемых  $\alpha$ -частицами радиоактивного распада, космическими лучами и в результате спонтанного либо вынужденного деления тяжёлых ядер. Искусств. источники Н. служат ядерные реакторы, ядерные взрывы, ускорители протонов (на ср. энергии) и электронов с мишенями из тяжёлых элементов. Источники монохроматических пучков Н. с энергией 14 МэВ являются низкоэнергетич. ускорители дейтронов с тритиевой или литиевой мишенью, а в будущем интенсивными источниками таких Н. могут оказаться термоядерные установки УТС. (См. Нейтронные источники.)

**Основные характеристики Н.**

Масса Н.  $m_n = 939,5734(27)$  МэВ/ $c^2 = 1,008664987(34)$  ат. ед. массы  $\approx 1,675 \cdot 10^{-24}$  г. Равность масс Н. и протона измерена с наиб. точностью из энергетич. баланса реакции захвата Н. протоном:  $n + p \rightarrow d + \gamma$  (энергия  $\gamma$ -кванта  $\epsilon_\gamma = 2,22$  МэВ),  $m_n - m_p = 1,293323(16)$  МэВ/ $c^2$ .

Электрич. заряд  $Q_n = 0$ . Наиболее точные прямые измерения  $Q_n$  выполнены по отклонению нуклонов холодных либо ультрахолодных Н. в электростатич. поле:  $Q_n \leq 3 \cdot 10^{-21} e$  ( $e$  — заряд электрона). Косв. данные по электрич. нейтральности макроскопич. кол-ва газа дают  $Q_n \leq 2 \cdot 10^{-22} e$ .

Спин Н.  $J_n = 1/2$  был определен из прямых опытов по расщеплению нукла Н. в неоднородном магн. поле

на две компоненты [в общем случае число компонент равно  $(2J + 1)$ ].

Внутренняя чётность Н. положительная. Изотопический спин  $I = 1/2$ , при этом проекция изотопич. спина Н.  $I_3 = -1/2$ . В рамках  $SU(3)$ -симметрии Н. входит в октет барьонов (см. Унитарная симметрия).

Магнитный момент Н. Несмотря на электр. нейтральность Н., его магн. момент существенно отличен от нуля:  $\mu_n = -1,91304184(88)\mu_p$ , где  $\mu_p = e\hbar/2m_p c$  — ядерный магнетон ( $m_p$  — масса протона); знак магн. момента определяется относительно направления его спина. Совпадение магн. моментов протона ( $\mu_p = 2,7928456$ ) и Н. позволило высказать гипотезу о роли  $\pi$ -мезонного окружения (шубы) голгого нуклона в формировании структуры нуклона. Соотношение  $\mu_p$  и  $\mu_n$  ( $\mu_p/\mu_n \approx -3/2$ ) может быть объяснено в рамках представлений о кварковой структуре нуклонов (см. ниже). Наиб. точно  $\mu_n$  измерен сравнением с  $\mu_p$  методом ядерного магнитного резонанса на пучке холодных Н.

Электрич. дипольный момент Н. Динамический, т. е. индуцируемый, дипольный момент Н. может возникать в сильном электр. поле, напр. при рассеянии Н. на тяжёлом ядре, либо при рассеянии  $\gamma$ -квантов на дейтроне. Изменение энергии частицы в электр. поле определяется соотношением  $\Delta\epsilon = -(\alpha_0/2) \cdot E^2$ , где  $\alpha_0$  — поляризуемость частицы,  $E$  — напряжённость поля. Эксперименты дают оценки  $\alpha_0 \leq 10^{-44}$  см<sup>3</sup> (принята система единиц, в к-рой  $\hbar = c = 1$ ).

Статич. электр. дипольный момент (ЭДМ) элементарной частицы должен быть тождественно равен нулю, если взаимодействия, к-рые она испытывает, инвариантны относительно обращения времени ( $T$ -инвариантны). ЭДМ отличен от нуля, если  $T$ -инвариантность нарушена, что, согласно теореме  $CPT$  (т.е. инвариантности относительно совместного произведения зарядового сопряжения, пространственной инверсии и обращения времени), эквивалентно нарушению  $CP$ -инвариантности. Хотя нарушение  $CP$ -инвариантности было обнаружено ещё в 1964 в распаде  $K_L^0$ -мезона, до сих пор  $CP$ -нейнвариантные эффекты для др. частиц (или систем) не наблюдались. В совр. объединённых каллибровочных теориях элементарных частиц нарушение  $T$  (или  $CP$ )-инвариантности может иметь место в электрослабом взаимодействии, хотя величина эффекта крайне мала. Разл. модели нарушения  $CP$ -инвариантности предсказывают величину ЭДМ Н. на уровне  $(10^{-24} - 10^{-29})$  е.с. Из-за своей электр. нейтральности Н. — весьма удобный объект для поисков  $CP$ -нейнвариантности. Наб. чувствительный и надёжный метод — метод ЯМР с электр. полем, наложенным на магн. поле. Изменение направления электр. поля при сохранении всех остальных характеристик резонансного спектрометра ЯМР вызывает смещение частоты ЯМР на величину  $\Delta\nu = -4dE$ , где  $d$  — ЭДМ. Для  $d \sim 10^{-28}$  е.с.м  $\Delta\nu \sim 10^{-8}$  Гц. Используя метод удержания ультрахолодных Н. в ЯМР-спектрометре, удалось достичь такой чувствительности. Полученное набл. точное ограничение на ЭДМ Н.:  $d_n \leq 2 \cdot 10^{-28}$  е.с.м.

**Структура Н.**

Н. наряду с протоном принадлежит к легчайшим барьонам. По совр. представлениям, он состоит из трёх легчайших валентных кварков (двух  $d$ -кварков и одного  $u$ -кварка) трёх цветов, образующих бесцветную комбинацию. Кроме валентных кварков и связывающих их глюонов нуклон содержит «море» виртуальных пар кварк — антикварк, в т. ч. тяжёлых (странных, очарованных и т. д.). Квантовые числа Н. целиком определяются набором валентных кварков, а пространств. структура — динамической взаимодействием кварков и глюонов. Особенностью этого взаимодействия является рост эфф. константы взаимодействия (эффекивного



заряда) с увеличением расстояния, так что размер области взаимодействия ограничен областью т. н. кофайнмента кварков — областью невышлета цветовых объектов, радиус которой  $\sim 10^{-13}$  см (см. *Удержание цвета*).

Послеодат. описание структуры адронов на основе совр. теории сильного взаимодействия — *квантовой хромодинамики* — пока встречает теоретич. трудности, однако для мн. задач вполне удовлетворит. результаты даёт описание взаимодействия нуклонов, представляемых как элементарные объекты, посредством обмена мезонами. Эксперим. исследование пространств. структуры Н. выполняется с помощью рассеяния высокоэнергичных лептонов (электронов, мюонов, нейтрино, расматриваемых в совр. теории как точечные частицы) на дейтронах. Вклад рассеяния на протоне измеряется в отд. эксперименте и может быть вычтен с помощью определ. вычислит. процедуры.

Упругое и квазиупругое (с расщеплением дейтрона) рассеяние электронов на дейтроне позволяет найти распределение плотности эл. зарядов, заряда и магн. момента Н. (*формфактор* Н.). Согласно эксперименту, распределение плотности магн. момента Н. с точностью порядка неск. процентов совпадает с распределением плотности эл. зарядов, заряда протона и имеет среднеквадратичный радиус  $\sim 0,8 \cdot 10^{-13}$  см (0,8 Ф). Магн. формфактор Н. довольно хорошо описывается т. в. дипольной ф-лой  $G_{Mn} = \mu_n(1 + q^2/0,71)^{-2}$ , где  $q^2$  — квадрат переданного импульса в единицах (ГэВ/c)<sup>2</sup>.

Более сложен вопрос о величине эл. зарядов. (зарядового) формфактора Н.  $G_{En}$ . Из экспериментов по рассеянию на дейтроне можно сделать заключение, что  $G_{En}(q^2) \leq 0,1$  в интервале квадратов переданных импульсов  $(0-1)$  (ГэВ/c)<sup>2</sup>. При  $q^2 \rightarrow 0$  вследствие равенства нулю эл. зарядов Н.  $G_{En} \rightarrow 0$ , однако экспериментально можно определить  $\partial G_{En}(q^2)/\partial q^2|_{q^2=0}$ . Эта величина наб. точно находится из измерения *длины* рассеяния Н. на эл. нейтральной оболочке тяжёлых атомов. Осн. часть такого взаимодействия определяется магн. моментом Н. Наб. точные эксперименты дают длину не-рассеяния  $a_{ne} = -1,378(18) \cdot 10^{-16}$  см, что отличается от расчётной, определяемой магн. моментом Н.:  $a_{ne} = -1,468 \cdot 10^{-16}$  см. Разность этих значений даёт среднеквадратичный эл. заряд, радиус Н.  $\langle r_{en}^2 \rangle = 0,088(12)$  Ф или  $\partial G_{En}(q^2)/\partial q^2|_{q^2=0} = -0,02$  Ф<sup>2</sup>. Эти цифр. нельзя рассматривать как окончательные из-за большого разброса данных разл. экспериментов, превышающих приводимые ошибки.

В *глубоко неупругом* процессе рассеяния (взаимодействия с рождением многих вторичных адронов, преим. пионов) налетающая точечная частица (лептон) взаимодействует непосредственно с точечными компонентами нуклона — кварками. Кварковый состав Н. (*ddu*) наб. гагдливо выявляется в экспериментах с взаимодействием нейтрино и антинейтрино высоких энергий с протонной и нейтронной (в составе дейтрона) мишенями. Напр., полное сечение  $\sigma$  реакции  $\nu_p \rightarrow \mu^- X$  (где X — совокупность адронов) примерно в два раза больше полного сечения реакции  $\nu_p \rightarrow \mu^- X$ , поскольку  $\nu_p$  взаимодействует только с *d*-кварком [кварковый состав протона (*uud*)]. Аналогично  $\sigma(\bar{\nu}_p) \approx 2\sigma(\bar{\nu}_n)$ . Поправки к этим простым соотношениям полных сечений связаны в осн. с наличием «моря» виртуальных пар кварк — антикварк.

### Взаимодействие Н.

Сильное взаимодействие Н. с нуклонами. Следствием изотопич. инвариантности является равенство сечений нейтрон-нейтронного и протон-протонного взаимодействия, если в последнем случае учесть вклад кулоновского взаимодействия. На кварк-глюонном уровне изотопич. симметрия является следствием малой разности масс *d*- и *u*-кварков (при малости самой массы кварков). Этим же объясняется малость разности масс про-

тона и Н., а также величина и знак этой разности (*d*-кварк тяжелее *u*-кварка).

При низких энергиях (до 15 МэВ) рассеяние Н. на протоне изотропно в системе центра масс, т. е. взаимодействие определяется в осн. *S*-волной (отсутс. движением с орбит. моментом  $L = 0$ ). Для *S*-волнового взаимодействия сечение рассеяния может быть охарактеризовано двумя параметрами — эфф. радиусом потенциала взаимодействия и длиной рассеяния. Занисмостью от отн. направления силов Н. и протона удаётся число параметров, т. к. длины рассеяния для синглетного (полный спин системы 0) и триплетного (полный спин 1) состояний различны (отличаются в неск. раз). Совр. значения длины рассеяния и эфф. радиусов (в Ф):  $a_1 = 5,39(3)$ ,  $a_2 = -23,74(9)$ ;  $r_{01} = 1,70(3)$ ,  $r_{02} = 2,67(3)$ . Параметры пр-рассеяния не могут быть непосредственно сопоставлены с *pp*- и *np*-рассеянием, поскольку системы *pp* и *np* в соответствии с *Паули принципом* не могут находиться в триплетном состоянии. Синглетная длина *pp*-рассеяния равна:  $a_{pp} = -7,815(8)$  Ф,  $r_0 = 2,758$  Ф. Расчёт кулоновского вклада в  $a_{pp}$  позволяет получить чисто ядерную длину *pp*-рассеяния  $a_{pp}^*$ , *k*-рая оказывается равной  $-17,25$  Ф. Согласно изотопич. инвариантности,  $a_{pp}^* = a_{nn}$ . Определение параметров *np*-рассеяния — сложная проблема, т. к. прямое взаимодействие свободных Н. до сих пор не наблюдалось из-за трудности эксперимента. Предложено неск. вариантов эксперимента по поиску прямого *np*-рассеяния в пучках высокоэнергичных импульсных или стационарных реакторов.

Наиб. определённые сведения об  $a_{nn}$  получены при исследовании реакции  $n-d \rightarrow 2n$ ;  $a_{nn} = -18,45(46)$  Ф, и реакции  $nd \rightarrow 2n$ :  $a_{nn} = -16,73(45)$  Ф. Расхождение результатов связано с неоднозначностью процедуры экстраполяции к нулевой энергии Н. и недостаточным описанием дейтрона. Сравнения  $a_{nn}$  и  $a_{pp}$  можно заключить, что изотопич. инвариантность соблюдается, хотя эксперим. точность недостаточна.

На раннем этапе развития ядерной физики большую роль для понимания свойств ядерных сил сыграли осн. характеристики дейтрона. Дейтрон является связанным триплетным состоянием *pp* с энергией связи  $-2,224$  МэВ. Синглетное состояние *np* имеет положит. энергию связи 64 кэВ и является резонансом. Др. резонансов и связанных состояний в области низких энергий в *pp*-системе нет. Эти два параметра позволяют определить потенциал нуклон-нуклонного взаимодействия и радиус ядерных сил. Наличие у дейтрона квадратного эл. зарядов. момента  $Q = 2,859 \cdot 10^{-27}$  см<sup>2</sup> приводит к выводу о существовании теоретич. ядерных сил.

Радиц. захват Н. протоном,  $np \rightarrow d\gamma$ , является простейшей ядерной реакцией. Сечение захвата при малых энергиях Н. зависит от скорости Н. как  $1/v$ . Для тепловых Н. ( $\sigma \lambda = 1,73A$ )  $\sigma_{np} = 0,314$  бар.

Изотопич. инвариантность ядерных сил и известная энергия связи синглетного *np*-состояния позволяют обосновать отсутствие связанного *nn*-состояния (днейтрона). Эксперим. поиски такого состояния в реакциях типа  $A + B \rightarrow C + 2n$  подтверждают этот вывод: сечение образования днейтрона  $\leq 10^{-29}$  см<sup>2</sup>. Не найдены также связанные состояния трёх и четырёх Н. Для большого числа Н. существование связанных состояний не исключено, хотя вероятность их образования в исследованных ядерных реакциях должна быть крайне мала.

При больших энергиях нуклон-нуклонного взаимодействия его характер меняется. При энергиях падающих нуклонов (200—400) МэВ, соответствующих их сближению на расстояния  $\sim 0,3$  Ф, во взаимодействии проявляются отталкиват. силы. Это явление обычно сопоставляется с существованием жёсткой отталкивающей сердечины (*кёра*) у нуклонов и приписывается доминирующей роли на малых расстояниях обмена *т*-

жельми векторными мезонами, напр.  $\omega$ -мезонами. Такого объяснение не единственно возможно. В модели «кварковых мезонов» (см. *Кварковые модели*) это же явление объясняется сличием на малых расстояниях двух нуклонов в один шестикварковый мезон, свойства к-рого качественно отличаются от свойств индивидуальных нуклонов, что приводит к тому, что экспериментально не наблюдаются два индивидуальных нуклона на малых расстояниях.

При более высоких энергиях взаимодействия становится существенно неупругими и сопровождаются множеств. рождением л-мезонов и более тяжёлых частиц (см. *Множественные процессы*). Свойства кварков и глюонов при этом играют определяющую роль в динамике взаимодействия, вызывая образование струй вторичных адронов (см. *Струя адронная*) и др.

**Взаимодействие Н. с ядрами и с веществом.** Как и при взаимодействии с протоном, взаимодействие Н. с ядрами описывается достаточно короткодействующими силами по сравнению с де-бройлевской длиной волны Н. Для малых энергий  $\sigma_n$  взаимодействие описывается длиной рассеяния и радиусом потенц. ямы. Отсутствие барьера для проникновения Н. в ядро приводит к тому, что для Н. малой энергии значит. роль играет канал реакции, идущий через образование *составного ядра* (компаунд-ядра). Нейтронные резонансы, определяемые состояниями компаунд-ядра при т. н. резонансных энергиях Н., хорошо разделяются (см. *Нейтронная спектроскопия*). При  $\sigma_n \sim (0,1-1)$  МаВ в средних и тяжёлых ядрах резонансы перекрываются и поведение сечения описывается статистически. Феноменологически поведение сечения взаимодействия Н. с ядрами описывается силовыми ф-циями  $s, p, d$  нейтронных резонансов с характерными флуктуациями. При более высоких энергиях феноменологич. описание усреднённых сечений достигается при помощи *оптической модели ядра*. Взаимодействие Н. большой энергии с ядрами сходно с взаимодействием протонов с ядрами.

Для медленных Н. определяющими становятся его волновые свойства, когерентное взаимодействие с упорядоченными конденсир. средами, Н. с длиной волны, близкой к межатомным расстояниям, являются важнейшим средством исследования структуры твёрдых тел и динамики возбуждения в них. Наличие у Н. маяг. момента делает пучки поларизов. Н. чрезвычайно чувствит. инструментом для исследования распределения намагничённости в веществе (см. *Нейтроннография*).

Особенностью взаимодействия Н. с большинством ядер является положит. длина рассеяния, что приводит к коэф. преломления  $< 1$ . Благодаря этому Н., падающие из вакуума на границу вещества, могут испытывать полное внутр. отражение. При скорости  $v < (5-8)$  м/с (ультрахолодные Н.) Н. испытывают полное отражение от границы с углеродом, никелем, бериллием и др. при любом угле падения и могут удерживаться в замкнутых объёмах. Это свойство ультрахолодных Н. широко используется в экспериментах (напр., для поиска ЭДМ Н.) и позволяет реализовать нейтронноопт. устройства (см. *Нейтронная оптика*).

Н. и слабое (электрослабое) взаимодействие. Важным источником сведений об электрослабом взаимодействии является  $\beta$ -распад свободного Н.  $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$ . На кварковом уровне этот процесс соответствует переходу  $d \rightarrow u + e + \bar{\nu}_e$ . Обратный процесс взаимодействия электронного антинейтрино с протоном,  $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ + n$ , обратным  $\beta$ -распадом. К этому же классу процессов относится *электронный захват*, имеющий место в ядрах,  $e^- \rightarrow \nu_e$ .

Распад свободного Н. с учётом кинематич. параметров описывается двумя константами — векторной  $G_V$ , являющейся вследствие *векторного тока сохранения* универс. константой слабого взаимодействия,

и аксиально-векторной  $G_A$ , величина к-рой определяется динамикой сильно взаимодействующих компонент нуклона — кварков и глюонов. Волновые ф-ции начального Н. и конечного протона и матричный элемент перехода  $p \rightarrow n$  благодаря изотопич. инвариантности вычисляются достаточно точно. Вследствие этого вычисление констант  $G_V$  и  $G_A$  из распада свободного Н. (в отличие от вычислений из  $\beta$ -распада ядра) не связано с учётом ядерно-структурных факторов.

Время жизни Н. без учёта нек-рых поправок равно:  $\tau_n = k(G_V^2 + 3G_A^2)^{-1}$ , где  $k$  включает кинематич. факторы и зависящие от граничной энергии  $\beta$ -распада кулоновские поправки и *радиационные поправки*.

Вероятность распада поляризов. Н. со спином  $S$ , энергиями и импульсами электрона и антинейтрино  $\sigma_{e, \nu_e}$  и  $p_e, p_{\nu_e}$  в общем виде описывается выражением:

$$w \sim \left( 1 + \alpha \frac{p_e p_{\nu_e}}{E_e E_{\nu_e}} + \frac{1}{|s|} \left( A \frac{p_e}{E_e} + B \frac{p_{\nu_e}}{E_{\nu_e}} + D \frac{[p_e p_{\nu_e}]}{E_e E_{\nu_e}} \right) \right).$$

Коэф. корреляции  $\alpha, A, B, D$  могут быть представлены в виде ф-ции от параметра  $a = (G_A/G_V) \exp(i\varphi)$ . Фаза  $\varphi$  отлична от нуля или л, если Т-инвариантность нарушена. В табл. приведены эксперим. значения для этих коэф. и вытекающие из них значения  $a$  и  $\varphi$ .

$\tau_n$	$\alpha$	A	B	D
898(14) с	-0,1070(51)	-0,114(53)	0,005(35)	$2,2(3) \cdot 10^{-4}$
$a$	1,259(17)	1,261(12)	—	0
$\varphi$	—	—	—	179,7(39)°

Имеется заметное отличие данных разл. экспериментов для  $\tau_n$ , достигающее неск. процентов.

Описание электрослабого взаимодействия с участием Н. при более высоких энергиях гораздо сложнее из-за необходимости учитывать структуру нуклонов. Напр.,  $\mu$ -захват,  $\mu^+ \rightarrow \nu_\mu$ , описывается по крайней мере удвоенным числом констант. Н. испытывает также электрослабое взаимодействие с др. адронами без участия лептонов. К таким процессам относятся следующие.

1) Распады гиперонов  $\Lambda \rightarrow p^0, \Sigma^+ \rightarrow p^+, \Sigma^- \rightarrow p^0 + \pi^-$  и т. д. Приведённая вероятность этих распадов в неск. раз меньше, чем у нестранных частиц, что описывается введением угла Кабиббо (см. *Кабиббо угол*).

2) Слабое взаимодействие  $p \rightarrow n$  или  $n \rightarrow p$ , к-рое проявляется как идиерные силы, не сохраняющие странности *чётность*. Обычная величина обусловленных ими эффектов порядка  $10^{-8}-10^{-7}$ .

Взаимодействие Н. со средними и тяжёлыми ядрами имеет ряд особенностей, приводящих в нек-рых случаях к значит. усилению эффектов *несохранения чётности в ядрах*. Один из таких эффектов — отност. разность сечения поглощения Н. с поларизацией по направлению распространения и против него, к-рая в случае ядра  $^{139}\text{La}$  равна 7% при  $\sigma_n = 1,33$  эВ, соответствующей р-волновому нейтронному резонансу. Причиной усиления является сочетание малой энергии, ширины состояний компаунд-ядра и большой плотности уровней с противоположной чётностью у этого компаунд-ядра, обеспечивающей на 2-3 порядка большее смешивание компонент с разной чётностью, чем у низколежащих состояний ядер. В результате ряд эффектов: асимметрия испускания  $u$ -квантов относительно спина захватываемого поляризов. Н. в реакции  $(p, \gamma)$ , асимметрия вылета заряж. частиц при распаде компаунд-состояний в реакции  $(n, p)$  или асимметрия вылета лёгкого (или тяжёлого) осколка деления в реакции  $(n, f)$ . Асимметрии имеют величину  $10^{-4}-10^{-3}$  при энергиях тепловых Н. В р-волновых нейтронных резонансах реализуется дополнит. усиление, связанное с подавленностью вероятности образования сохраняющей чётность компоненты этого компаунд-состояния (из-за малой нейтронной ширины

$p$ -резонанса) по отношению к примесной компоненте с противоположной чёткостью, являющейся  $s$ -резонансом. Именно сочетание неск. факторов усиления позволяет крайне слабую эффекту проявляться с величинами, характерной для ядерного взаимодействия.

**Взаимодействия с нарушением барионного числа.** Теоретич. модели *великого объединения и суперобъединения* предсказывают нестабильность барионов — их распад в лептоны и мезоны. Эти распады могут быть заметны только для легчайших барионов —  $p$  и  $n$ , входящих в состав атомных ядер. Для взаимодействия с изменением барионного числа на 1,  $\Delta B = 1$ , можно было бы ожидать превращения  $n$  типа:  $n \rightarrow e^+ \pi^-$ ,  $n \rightarrow \mu^+ \pi^-$ , или превращения с испусканием странных мезонов. Поиски такого рода процессов производились в экспериментах с применением подземных детекторов с массой в неск. тысяч тонн. На основании этих экспериментов можно сделать заключение, что время распада  $n$  с нарушением барионного числа составляет более  $10^{22}$  лет.

Др. возможный тип взаимодействия с  $\Delta B = 2$  может проявиться к явлению взаимопревращения  $n$  и *актинейтронов* в вакууме, т. е. к осцилляции  $n \leftrightarrow \bar{n}$ . В отсутствие внеш. полей или при их малой величине состояния  $n$  и антинейтрона вырождены, поскольку массы их одинаковы, поэтому даже сверхслабое взаимодействие может их перемешивать. Критерием малости внеш. полей является малость энергии взаимодействия магн. момента  $n$  с магн. полем ( $n$  и  $\bar{n}$  имеют противоположные по знаку магн. моменты) по сравнению с энергией, определяемой временем  $T$  наблюдения  $n$  (согласно соотношению неопределённостей),  $\Delta E \leq \hbar T^{-1}$ . При наблюдении рождения антинейтронов в пучке  $n$  от реактора или др. источника  $T$  есть время пролёта  $n$  до детектора. Число антинейтронов в пучке растёт с ростом времени пролёта квадратично:  $N_{\bar{n}}/N_n \sim (T/\tau_{osc})^2$ , где  $\tau_{osc}$  — время осцилляции.

Прямые эксперименты по наблюдению рождения  $\bar{n}$  в пучках холодных  $n$  от высокопоточного реактора дают ограничение  $\tau_{osc} > 10^7$  с. В готтовских экспериментах можно ожидать увеличения чувствительности до уровня  $\tau_{osc} \sim 10^8$  с. Ограничивающими обстоятельствами являются макс. интенсивность пучков  $n$  и имитация выведенный англизаций антинейтронов в детекторе космич. лучами.

Др. метод наблюдения осцилляций  $n \leftrightarrow \bar{n}$  — наблюдение англизаций антинейтронов, к-рые могут образовываться в стабильных ядрах. При этом из-за большого отличия энергий взаимодействий возникающего антинейтрона в ядре от энергии связи  $n$ , эфф. время наблюдения становится  $\sim 10^{-22}$  с, но большое число наблюдаемых ядер ( $\sim 10^{23}$ ) частично компенсирует уменьшение чувствительности по сравнению с экспериментом на пучках  $n$ . Из данных подземных экспериментов по поиску распада протона об отсутствии событий с энерговыведением  $\sim 2$  ГэВ можно заключить с нек-рой неопределённостью, анисаящей от незнания точного вида взаимодействия антинейтрона внутри ядра, что  $\tau_{osc} > (1-3) \cdot 10^7$  с. Существование повышенного предела  $\tau_{osc}$  в этих экспериментах затруднено фоном, обусловленным взаимодействием космич. нейтрино с ядрами в подземных детекторах.

Следует отметить, что поиски распада нуклона с  $\Delta B = 1$  и поиски  $n\bar{n}$ -осцилляций являются независимыми экспериментами, т. к. выявляются принципиально разл. видами взаимодействия.

**Гравитационное взаимодействие  $n$ . Нейтрон** — одна из немногих элементарных частиц, падение к-рой в гравитат. поле Земли можно наблюдать экспериментально. Прямое измерение ускорения свободного падения для  $n$  выполнено с точностью 0,3% и не отличается от макроскопического. Актуальным остаётся вопрос о соблюдении *эквивалентности принципа* (равенства инертной и гравитат. масс) для  $n$  и протонов.

Самые точные эксперименты выполнены методом Этвеша для тел, имеющих разные ср. значения отношения  $A/Z$ , где  $A$  — ат. номер,  $Z$  — заряд ядер (в ед. элементарного заряда  $e$ ). Из этих опытов следует одинаковость ускорения свободного падения для  $n$  и протонов на уровне  $2 \cdot 10^{-9}$ , а равенство гравитат. и инертной масс на уровне  $\sim 10^{-12}$ .

Гравитат. ускорение и замедление широко используются в опытах с ультрахолодными  $n$ . Применение гравитат. рефрактометра для холодных и ультрахолодных  $n$  позволяет с большой точностью измерять длины когерентного рассеяния  $n$  на веществе.

### Н. в космологии и астрофизике

Согласно совр. представлениям, в модели Горячей Вселенной (см. *Горячая Вселенная теория*) образование барионов, в т. ч. протонов и  $n$ , происходит в первые минуты жизни Вселенной. В дальнейшем некр-я часть  $n$ , не успевших распасться, захватывается протонами с образованием  ${}^4\text{He}$ . Соотношение водорода и  ${}^4\text{He}$  при этом составляет по массе 70% к 30%. При формировании звёзд и их эволюции происходит дальнейший *нуклеосинтез*, вплоть до ядер железа. Образование более тяжёлых ядер происходит в результате взрывов сверхновых с рождением нейтронных звёзд, создающих возможность последоват. захвата  $n$ . дуклами. При этом комбинация т. н.  $s$ -процесса — медленного захвата  $n$  с  $\beta$ -распадом между последовательными захватами и  $r$ -процесса — быстрого последоват. захвата при взрывах звёзд в осн. может объяснить наблюдаемую *распространённость элементов* в космич. объектах.

В первичной компоненте космич. лучей  $n$  из-за своей нестабильности вероятно отсутствуют. Н., образующиеся у поверхности Земли, диффундирующие в космич. пространство и распадаются там, по-видимому, вносят вклад в формирование электронной и протонной компоненты *радиационных поясов* Земли.

Лит.: Гуревич И. С., Тарасов Л. В., Физика нейтронов низких энергий, М., 1945; Ален С. и др. в Ю. А., Фундаментальные свойства нейтрона, 2 изд., М., 1982.

В. М. Лобачев.

**НЕЙТРОНИЗАЦИЯ ВЕЩЕСТВА** — превращение протонов, входящих в состав вещества звёзд, в нейтроны на заключит. стадиях *эволюции звёзд*. Молодые звёзды состоят в основном из водорода с лобавкой гелия и малой примесью более тяжёлых хим. элементов, поэтому в начале термоядерной эволюции звёзд все нейтроны в звёздном веществе связаны в атомных ядрах и их суммарное число невелико (на 6 протонов в среднем приходится ок. 1 нейтрона). В конце эволюции кол-во нейтронов резко возрастает, на что указывает существование *нейтронных звёзд* — одного из продуктов звёздной эволюции.

После завершения водородных термоядерных реакций (см. *Водородный цикл и Углеродно-азотный цикл*), в результате к-рых водород в центр. области звезды полностью превращается в гелий, нейтроны и протоны в звёздном веществе становятся примерно поровну. Это обогащение звёздного вещества нейтронами не оказывает решающего влияния на строение звезды, главное здесь — выделение энергии в термоядерных реакциях синтеза гелия.

Однако на заключит. стадиях эволюции звёзд плотность вещества в их центр. областях сильно возрастает и электронный газ становится вырожденным (см. *Вырожденный газ*). Энергия вырожденных электронов достигает такой величины, что они уже могут, несмотря на энергетич. барьер, захватываться атомными ядрами. Начинаются процессы т. н. обратного *бета-распада*, посредством к-рых протоны превращаются внутри атомных ядер в нейтроны. Именно это процессе множеств. захвата электронов атомными ядрами, сопровождающийся испусканием нейтрино  $\nu$ , наз. и *нейтронизацией*.

Реакция захвата электронов  $e^-$  атомными ядрами ( $A, Z$ ) ( $A$  — массовое число,  $Z$  — порядковый номер элемента) записывается в след. виде:

$$(A, Z) + e^- \rightarrow (A, Z-1) + \nu. \quad (1)$$

Энергетич. порог реакции (1) обычно велик, поэтому только при высоких плотностях вещества, характерных для конечных стадий эволюции звёзд, ферми-энергия  $\mathcal{E}_F$  электронов может превысить критич. величину  $\mathcal{E}_c$  — порог нейтронизации:

$$\mathcal{E}_F > \mathcal{E}_c = Q_{A,Z} - Q_{A,Z-1} + Q_n. \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_F$  — ферми-энергия без учёта энергии покоя электрона,  $Q_{A,Z}$  — энергия связи ядра ( $A, Z$ ), а  $Q_n = (m_n - m_p - m_e) \cdot c^2 = 0,7825$  МэВ — энергия бета-распада нейтрона. При выполнении условия (2) реакция (1), в к-рую вступают электроны с энергией  $\mathcal{E}$  в интервале  $\mathcal{E}_c < \mathcal{E} < \mathcal{E}_F$ , оказывается энергетически выгодной: энергии системы уменьшается в каждом акте на величину  $\mathcal{E} - \mathcal{E}_c$ , уносимую электронным нейтрино. Продукт нейтронизации — радиоактивные ядра ( $A, Z-1$ ); они устойчивы в вырожденном состоянии, поскольку их распад запрещён Паули принципом: все уровни с энергиями, меньшими  $\mathcal{E}_F$ , заняты, а энергии электронов в бета-распадах не превышают  $\mathcal{E}_c$ .

Пороги первых двух стадий нейтронизации для ряда атомных ядер, образующихся на последоват. стадиях термоядерной эволюции звёзд, рассчитанные по Ф-ле (2), представлены в табл. В 1-м и 5-м столбцах даны сокращённые записи реакций нейтронизации (опущены символы электрона и нейтрино). Характеристики электронного газа в момент начала Н. в. фиксируются условием  $\mathcal{E}_F = \mathcal{E}_c$ , из к-рого однозначно определяются критич. значения числа электронов в единице объёма  $N_e$  и электронного давления  $P_e$  (4-й столбец). В 3-м столбце приведена критич. плотность вещества при нейтронизации, вычисленная в предположении, что вещество состоит целиком из нейтронизуемого хим. элемента:  $\rho_c = (A/Z)m_u N_e$  ( $m_u$  — атомная единица массы).

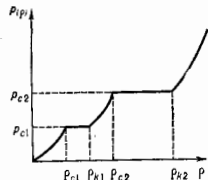
Пороги нейтронизации

Первая реакция нейтронизации	$\mathcal{E}_c$ , МэВ	$\rho_c$ , г/см <sup>3</sup>	$P_e$ , дин/см <sup>2</sup>	Вторая реакция нейтронизации	$\mathcal{E}_c$ , МэВ
<sup>1</sup> H → <sup>0</sup> n	0,782	1,22 · 10 <sup>7</sup>	3,05 · 10 <sup>14</sup>	—	—
<sup>2</sup> He → <sup>3</sup> He	0,0186	2,95 · 10 <sup>8</sup>	1,41 · 10 <sup>16</sup>	T → <sup>3</sup> He	9,26
<sup>3</sup> He → <sup>4</sup> He	20,6	1,37 · 10 <sup>11</sup>	3,49 · 10 <sup>18</sup>	<sup>3</sup> He → <sup>4</sup> He	9,26
<sup>4</sup> He → <sup>3</sup> He	13,4	3,90 · 10 <sup>10</sup>	6,51 · 10 <sup>18</sup>	<sup>10</sup> B → <sup>11</sup> B	11,6
<sup>6</sup> Li → <sup>5</sup> Li	10,4	1,90 · 10 <sup>10</sup>	2,50 · 10 <sup>18</sup>	<sup>10</sup> B → <sup>10</sup> C	8,01
<sup>7</sup> Li → <sup>6</sup> Li	7,03	6,22 · 10 <sup>9</sup>	5,81 · 10 <sup>17</sup>	<sup>10</sup> B → <sup>10</sup> B	3,82
<sup>9</sup> Be → <sup>8</sup> Be	5,52	3,17 · 10 <sup>9</sup>	2,25 · 10 <sup>17</sup>	<sup>10</sup> B → <sup>9</sup> B	2,47
<sup>10</sup> B → <sup>10</sup> B	4,8	2,68 · 10 <sup>9</sup>	1,20 · 10 <sup>17</sup>	<sup>10</sup> Al → <sup>10</sup> Mg	1,83
<sup>12</sup> Ca → <sup>11</sup> Ca	1,31	9,76 · 10 <sup>7</sup>	1,93 · 10 <sup>15</sup>	<sup>40</sup> K → <sup>40</sup> Ar	7,51
<sup>55</sup> Fe → <sup>54</sup> Fe	3,70	1,15 · 10 <sup>8</sup>	5,28 · 10 <sup>15</sup>	<sup>55</sup> Mn → <sup>55</sup> Cr	1,64

В случае достаточно медленного (квазистатистического) сжатия число электронов в единице объёма  $N_e$  и давление электронов  $P_e$  остаются практически неизменными и равными их начальным значениям  $N_e$  и  $P_e$ , пока не исчерпается весь исходный хим. элемент. При этом устанавливается небольшое превышение  $\mathcal{E}_F$  над  $\mathcal{E}_c$ , такое, что уменьшение  $N_e$  в реакции (1) компенсируется его увеличением вследствие сжатия вещества. Отличие  $\mathcal{E}_F$  от  $\mathcal{E}_c$  тем меньше, чем медленнее сжатие, скорость к-рого определяется условиями гидростатич. равновесия звёзд; напр., в случае *блago* карлика притяж. сжатия могут быть потеря энергии посредством эл.-магн. и нейтринного излучений или увеличение его массы за счёт аккреции.

Зависимости  $\rho_c$ ,  $\mathcal{E}_F$  и  $N_e$  от плотности медленно сжимающегося и нейтронизирующегося вещества имеют ступенчатый вид (рис.): пологие, почти горизонтальные, участки соответствуют протеканию реакции (1), а крутые подъёмы — врем. прекращению Н. в. до того мо-

мента, пока  $\mathcal{E}_F$  не достигнет нового, более высокого порога нейтронизации. Каждому пологому участку может соответствовать не одна, а неск. реакций типа (1). Это связано с тем, что порог нейтронизации ядра ( $A, Z-1$ ) часто бывает меньше, чем у исход-



Зависимость (схематическая) давления  $P$  от плотности  $\rho$  при нейтронизации холодного звёздного вещества.

исходящего ядра ( $A, Z$ ). В результате за первой реакцией нейтронизации быстро следует вторая реакция и т. д., пока не образуется ядро ( $A, Z_n$ ) с  $Z_k < Z$  и порогом нейтронизации, большим, чем у ядра ( $A, Z$ ). В отличие от первой реакции нейтронизации, для которой  $\mathcal{E}_F \approx \mathcal{E}_c$ , эти повторные реакции являются неравновесными (в термодинамич. смысле). В пик исчезают электроны с такими энергиями, что разность  $\mathcal{E}_F - \mathcal{E}_c$  в среднем составляет заметную долю от  $\mathcal{E}_F$ . Это вызывает неравновесную перестройку ферми-распределения электронов, сопровождающуюся выделением теплоты. Т. о., несмотря на то, что нейтрино уносит почти всю освобождённую энергию (за исключением ничтожно малой доли, передаваемой ядру в соответствии с законом сохранения импульса), нейтронизуемое вещество всё же нагревается. Такой источник теплоты учитывают, в частности, при расчётах теплового баланса белых карликов.

Конеч каждого пологого участка зависимости  $\rho_e$ ,  $N_e$  и  $\mathcal{E}_F$  от плотности отвечает полному превращению ядра ( $A, Z$ ) в ядро ( $A, Z_n$ ). При этом  $\rho_e/\rho_c = Z/Z_k$  (равно  $1/2$  для перехода  $^{10}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{C}$ ). Для промежуточных значений плотностей ( $\rho_c < \rho < \rho_k$ ) вещество представляет собой смесь этих ядер.

Цепочка реакций (1) в конце концов приводит к образованию ядра, сильно перегруженного нейтронами. Как только ядро ( $A, Z-1$ ) оказывается неустойчивым по отношению к испусканию нейтронов, Н. в. продолжается с выделением в каждом акте одного или неск. нейтронов:

$$(A, Z) + e^- \rightarrow (A-k, Z-1) + k\nu + \nu. \quad (3)$$

Яркий пример — нейтронизация гелия (табл.). Порог реакции (3) для ядер на границе нейтральной стабильности  $\mathcal{E}_c \approx 25$  МэВ, чем соответствует критич. плотность Н. в.  $\rho_c \approx 4 \cdot 10^{11}$  г/см<sup>3</sup> (с учётом, что  $A/Z = -3-4$ ). При дальнейшем повышении плотности Н. в. вступает в конечную фазу: в смеси из свободных нейтронов и предельно перегруженных нейтронами ядер равновесие сдвигается с ростом плотности в сторону преобладания нейтронов. Переход к ядерным плотностям можно считать концом процесса Н. в.

Приведённое выше описание Н. в. относится к основному к вырожденному веществу при темп-ре  $T \ll \mathcal{E}_F/k$ . При рассмотрении нейтронизации вещество можно считать холодным, если дополнительно  $T \ll \mathcal{E}_F - \mathcal{E}_c$ . Эти неравенства могут нарушаться на конечных стадиях эволюции массивных звёзд и в процессе *гравитационного коллапса*, когда звёздное вещество оказывается относительно горячим. Нейтронизация горячего вещества обладает рядом особенностей. Во-первых, становится возможным бета-распад:

$$(A, Z-1) \rightarrow (A, Z) + e^- + \bar{\nu}. \quad (4)$$

Во-вторых, появляются позитроны, и, хотя их концентрация невелика, реакция

$$e^+ + (A, Z-1) \rightarrow (A, Z) + \bar{\nu} \quad (5)$$

обычно оказывается эффективнее реакции (4). В третьих, при темп-рах, превышающих  $\sim 5 \cdot 10^9$  К, ядерные

реакции становится столь быстрыми, что устанавливаются условия определённых концентрации разл. атомных ядер, а также температуры, плотности и соотношения между полными числами нейтронов и протонов в системе (с учётом как свободных, так и связанных в ядрах). Это последнее соотношение регулируется реакциями (1), (4) и (5). В них участвуют ядра как в основном, так и в возбуждённых состояниях, а также свободные нейтроны и протоны. Появление новых нейтронов в реакции (1) компенсируется их исчезновением в реакциях (4) и (5) — устанавливается т. н. кинетическое равновесие бета-процессов. С увеличением плотности равновесие сдвигается в сторону преобладания нейтронов.

Н. в. необходимо учитывать при описании строения и устойчивости звёзд на конечных стадиях их эволюции, при исследовании динамики образования нейтронных звёзд и чёрных дыр и при рассмотрении ряда вопросов, касающихся происхождения хим. элементов.

Лит.: Шапиро С., Тьюколски С., Чёрные дыры, белые карлики и нейтронные звезды, пер. с англ., т. 1—2, М., 1985.

**НЕЙТРОННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ** — раздел нейтронной оптики, метод, основой которого является измерение разности фаз интерферирующих нейтронных волн. Нейтронные интерферометры (НИ) — прецизионные приборы, в к-рых осуществляется пространств. разделение исходного пучка нейтронов, как правило, на два когерентных пучка I и II и их последующее совмещение. При этом интенсивность  $I$  результирующего пучка связана с разностью фаз  $\Delta\varphi$  волновых ф-ций  $\psi_I$  и  $\psi_{II}$  пучков I и II соотношением:

$$I = |\psi_I + \psi_{II}|^2 \sim 1 + \cos\Delta\varphi. \quad (1)$$

Из (1) видно, что любое воздействие на нейтрон, приводящее к изменению фазы волновой ф-ции в одном из пучков, может быть зарегистрировано по изменению интенсивности  $I$ .

Так же как и в обычной оптике, различают НИ с пространственным и амплитудным делениями волнового фронта (см. *Интерферометры*). В интерферометрах с пространств. делением волнового фронта исходный пучок с волновым фронтом  $W$  делится на 2 фрагмента  $W_1$  и  $W_2$  (рис. 1, а). Интерференц. картину можно регист-

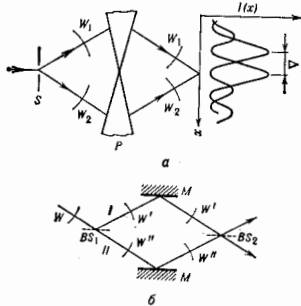


Рис. 1. Схематическое изображение нейтронных интерферометров с пространственным (а) и амплитудным (б) делением волнового фронта.

стрировать, измеряя распределение интенсивности в области их суперпозиции. При изменении разности фаз  $\Delta\varphi$  между пучками происходит такое перераспределение интенсивности, что интерференц. картина смещается на величину  $\Delta$ , пропорциональную  $\Delta\varphi$ . Примерами таких НИ являются: бипризменный НИ (аналог

интерферометра Френеля) и двухщелевой НИ (аналог интерферометра Юнга). В приборах такого типа необходимо обеспечить высокую степень пространств. когерентности освещающего пучка, т. к. интерферометр разл. участки  $W_1$  и  $W_2$  исходного волнового фронта  $W$ . Это приводит к необходимости использовать узкую апертурную щель  $S$ , что предопределяет низкую светосилу прибора.

В интерферометрах с амплитудным делением волнового фронта (рис. 1, б) из исходной волны  $W$  с помощью когерентного делителя  $BS_1$  (напр., частично отражающего элемента) получают 2 волны  $W'$  и  $W''$  с одинаковыми волновыми фронтами. Эти волны совмещают в устройстве  $BS_2$ , обычно подобном  $BS_1$ . В результате суперпозиции двух фронтов возникает интерференц. полоса бесконечной ширины. При изменении  $\Delta\varphi$  возникает модуляция интенсивности  $I$  выходящего пучка.

Большинство НИ предназначено для тепловых нейтронов (длина волны  $\lambda_n \approx 2 \text{ \AA}$ ). Малость  $\lambda_n$  приводит к значит. отгибанию НИ от оптических схем. Наиб. широкое распространение получили НИ на совершенных монокристаллах, использующих механизм брэгговской дифракции для когерентного деления пучков (см. *Дифракция нейтронов*). Примером может служить интерферометр III-образной формы (рис. 2), к-рый вырезается

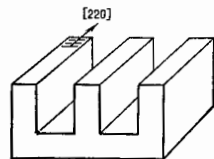


Рис. 2. Нейтронный интерферометр из монокристалла Si, стрелка указывает направление кристаллографической оси [220].

из монокристалла (как правило, из Si). Величина пространств. разделения интерферирующих пучков в этих приборах достигает 2 см. Особенностью таких НИ является принципиальное ограничение на  $\lambda_n$  —  $\lambda_n \geq d_c$ , где  $d_c$  — постоянная кристаллич. решётки, а их размеры ограничиваются технологией выращивания совершенных монокристаллов.

Переход к НИ больших размеров, способных работать с нейтронами сколь угодно больших  $\lambda_n$ , возможен, если использовать в качестве делителя и совместителя дифракц. решётки. Они осуществляют пространств. модуляцию амплитуды или фазы волновой ф-ции нейтрона, что приводит к образованию распространяющихся под разными углами когерентных нейтронных волн (рис. 3). Иза-за действия силы тяжести нейтроны

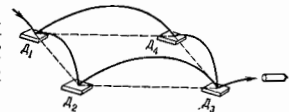


Рис. 3. Схема нейтронного интерферометра для очень мелких нейтронов:  $D_1$ ,  $D_2$  —  $A_1$ ,  $A_2$  — дифракционные решётки.

двигаются по параболам, а дифракц. решётки должны быть расположены горизонтально.

НИ позволяют чрезвычайно точно измерять нейтронный показатель преломления  $n$  образца, помещённого в одно из плеч прибора. Возникающая при этом разность фаз определяется выражением:

$$\Delta\varphi + k(n-1)d,$$

где  $k$  — волновое число,  $d$  — толщина образца. Величина  $n$  связана с длиной когерентного рассеяния нейтронов на атомных ядрах (см. *Нейтронная оптика, Нейтронграфия структурная*). Измерение длины ко-

герентного рассеяния важно для изучения природы взаимодействия нейтронов с ядрами.

С помощью НИ выполнен ряд опытов, позволивших продемонстрировать справедливость нек-рых выводов квантовой механики: спириальный характер волновой ф-ции фермиона (нейтрона), влияние на интерференцию нейтронов волн неперпендикулярности системы координат. Проверено на опыте равенство инертной и гравитационной масс нейтрона (*эквивалентности принцип*) и др.

Лит.: Neutron Interferometry, ed. by U. Bonse, H. Rauch, Oxf., 1978; Голубев Л. А., Дифракция-создающий нейтрон, интерферометры, «Physica», В + С, 1988, в. 151, с. 50.

**НЕЙТРОННАЯ ОПТИКА** — раздел нейтронной физики, в к-ром изучаются волновые свойства нейтрона, процессы распространения нейтронов волн в разных веществах и полях. К числу таких процессов относятся дифракция и интерференция нейтронов волн, преломление и отражение нейтронных пучков на границе раздела двух сред. В силу принципа корпускулярно-волнового дуализма нейтрон может проявлять себя как частица с энергией  $\epsilon$  и импульсом  $p$  или как волна с частотой  $\omega = 2\pi\epsilon/h$ , длиной волны  $\lambda = h/p$  и волновым вектором  $k = 2\pi/\lambda$ . Волновые свойства отчётливо проявляются у нейтронов низких энергий, длина волны к-рых порядка или больше межатомных расстояний в веществе ( $\sim 10^{-8}$  см).

Из-за отсутствия у нейтронов электр. заряда они глубоко проникают внутрь большинства материалов, что позволяет рассматривать их как достаточно прозрачные среды для распространения нейтронных волн. Большая часть нейтронно-опт. явлений имеет аналогию с оптич. явлениями, несмотря на различную природу полей нейтронного и светового излучений. Световые волны описываются ур-ниями Максвелла, а нейтронная волна (нейтронная волновая ф-ция) подчиняется ур-нию Шрёдингера. Распространение волн в среде, согласно Гюйгенса принципу, связано с их рассеянием и последующей интерференцией вторичных волн. В случае нейтронного рассеяния обусловлено гл. обр. их короткодействующим *сильным взаимодействием* с атомными ядрами, в случае световых волн — дальнедействующим *электромагнитным взаимодействием* с электронами атомных оболочек. Наличие у нейтрона магн. момента приводит к взаимодействию с магн. моментами атомов, на чём основано т. н. магнитное рассеяние нейтронов, не имеющее аналогии в оптике. *Неупругое рассеяние нейтронов* можно сопоставить с комбинационным рассеянием света. В отличие от векторной световой волны, нейтронная волна является спиновой. Поэтому все поляризац. явления в Н. о., связанные с наличием у нейтрона спина, существенно отличаются от оптич.ских, хотя и здесь есть аналогии; напр., поляризация нейтронов можно (в вектор приближении) сопоставить круговую поляризацию света. В Н. о. в нек-рых случаях имеет место двойное лучепреломление и дихроизм (см. ниже).

**Распространение нейтронных волн в среде.** Для нейтронов с энергией  $\epsilon$ , распространяющихся в свободном пространстве, решением ур-ния Шрёдингера (нерегулярное приближение) является суперпозиция плоских  $\{A_k \exp[i(\omega t - kr)]\}$  и сферических  $\{(\alpha/r_1) \exp[i(\omega t - kr_1)]\}$  волн, где  $\omega = 2\pi\epsilon/h$  — частота волны,  $k = 2\pi m v/h$  — волновой вектор,  $k = |k|$  — волновое число,  $r$  — радиус-вектор точки,  $r_1$  — расстояние от  $i$ -го точечного источника нейтронных волн или рассеивателя. Конкретное решение зависит от граничных условий задачи и выбирается путём определения соответствующих амплитуд  $A_k$  и  $\alpha_i$  плоских и сферич. волн.

Анализ задачи о распространении нейтронной волны в среде показывает, что интерференция плоской первичной волны, имеющей волновой вектор  $K$ , с рассеянными сферич. волнами приводит к быстрому затуханию первичной волны. Вместо неё в среде распространяется

волна с волновым вектором  $K^{CP}$ , величина к-рого даёт ся соотношением:

$$|K^{CP}|^2 \approx |k|^2 - 4\pi N b. \quad (1)$$

Здесь  $N$  — число ядер-рассеивателей в единице объёма,  $b$  — т. н. когерентная длина рассеяния нейтрона на закреплённом ядре. Длина рассеяния  $b$  связана с сечением упругого когерентного рассеяния медленных нейтронов соотношением:

$$\sigma_{\text{ког}} \approx 4\pi b^2,$$

к-рое соответствует рассеянию на непроницаемой сфере радиуса  $b$ . Для большинства ядер длина  $b > 0$  и по порядку величины равна размеру ядра ( $\sim 10^{-12}$  см). Длины рассеяния являются эмпирич. величинами, нерегулярно меняющимися от ядра к ядру (см. *Дифракция нейтронов*). Для среды, содержащей разл. атомные ядра, произведение  $Nb$  в ф-ле (1) должно быть заменено на сумму  $\sum_i N_i b_i$  по соответствующим сортам ядер  $i$ .

Направление распространяющейся в среде волны определяется из условия равенства параллельных границ раздела вакуум — среда компонент волновых векторов  $k = k^{CP}$ , и ф-ла (1) фактически снижает только нормальные компоненты векторов  $k_i$  и  $k_i^{CP}$ , т. е.  $(k_i^{CP})^2 = (k_i)^2 - 4\pi N b$ . Отсюда следует известный из оптики закон преломления  $\sin \theta = n \sin \theta'$ , где  $\theta$  и  $\theta'$  — углы падения и преломления, а  $n$  — показатель преломления среды для нейтронных волн:

$$n^2 = 1 - \frac{4\pi}{k^2} N b = 1 - \lambda^2 \frac{N b}{\pi}. \quad (2)$$

Особые дифракц. явления возникают при прохождении нейтронов через кристаллы, когда интерференция нейтронных волн, рассеянных на регулярно расположенных рассеивателях, приводит к усилению интенсивности волн в направлениях, соответствующих зеркальному отражению от атомных плоскостей кристалла при выполнении *Брэгга — Вульфа условия*:  $l = 2d \cos \theta$ , где  $l$  — кратность отражения,  $d$  — межплоскостное расстояние,  $\theta$  — угол падения нейтронов на отражающую атомную плоскость.

Т. к. нейтрон обладает массой  $m$ , то изменение волнового числа при преломлении на границе среды означает изменение не только его импульса, но и кинетич. энергии. Следовательно, среде можно приписать нек-рый эффективный (оптический) потенциал  $U$ . Связь показателя преломления  $n$  и  $U$  определяется выражением:

$$n^2 = \frac{(k^{CP})^2}{k^2} = 1 - \lambda^2 \frac{2m}{h^2} U. \quad (3)$$

Сравнивая (2) и (3), получаем:

$$U = \frac{h^2}{2\pi m} N b. \quad (4)$$

Т. к. для большинства ядер  $b > 0$ , то взаимодействие нейтронов со средой, как правило, носит характер отталкивания ( $U > 0$ ). Величина потенциала  $U$  мала для всех материалов ( $\leq 3 \cdot 10^{-7}$  эВ). Для тепловых нейтронов с энергией  $\epsilon \approx 10^{-2}$  эВ  $n$  мало отличается от 1. При  $b > 0$   $n^2 < 1$  и уменьшается с уменьшением  $\epsilon$ . Крайне медленные нейтроны (*ультраохлажденные нейтроны*) с энергией  $\epsilon < U$  не могут проникнуть внутрь материала и полностью отражаются от его поверхности аналитич. отражению световых волн от поверхности металлических зеркал.

В случае магн. материалов кроме взаимодействия нейтрона с атомными ядрами следует учитывать его взаимодействие с магн. моментами электронных оболоч-

чек (см. Магнитная нейтрография). Для очень медленных нейтронов необходимо также принимать во внимание и наличие силы тяжести Земли. В результате к оптич. потенциалу добавляются потенциалы  $U_m = -\mu B$ ,  $U_{грав} = mgz$ , где  $\mu$  — магн. момент нейтрона,  $B$  — магн. индукция,  $g$  — ускорение свободного падения,  $z$  — высота. Общее выражение для показателя преломления имеет вид:

$$n^2 = 1 - \frac{h^2 N b}{4\pi m^2 v^2} - \frac{2gz}{v^2} + \frac{2|\mu B|}{mv^2}. \quad (5)$$

Неоднородность хим. состава среды, наличие гравит. и магн. членов в (5) приводят к зависимости  $n$  от координат. При этом, как и в оптике неоднородных сред, имеет место искривление лучей. Наличие двух знаков у последнего слагаемого в (5) соответствует двум возможным ориентациям спина нейтрона относительно  $H$ . Различие показателя преломления для двух спиновых компонент приводит к магн. двойному лучепреломлению (рис. 1). Пучок нейтронов испытывает последовательно брэгговскую дифракцию на двух кристаллах  $Si$ . Расположенная между ними ферромагн. призма по-разному отклоняет нейтроны с ориентацией спина параллельно полю ( $\odot$ ) и антипараллельно ( $\ominus$ ). В ре-

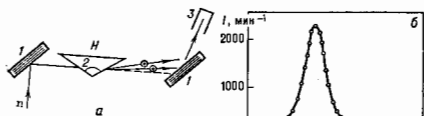


Рис. 1. а — Двойное лучепреломление нейтронного пучка в ферромагнитной призме; 1 — кристаллы  $Si$ ; 2 — ферромагнитная призма; 3 — детектор нейтронов; б — кривая отражения без призмы; в — кривая отражения с призмой; 1 — счёт детектора нейтронов.

зультате дифракц. отражение от 2-го кристалла  $Si$  происходит при двух разных поворотах кристалла и регистрируются два пика, соответствующие двум противоположным ориентациям спина нейтрона. Из-за спиновой зависимости ядерных сил двойное лучепреломление имеет место также в среде, содержащей ориентированные ядра (ядерный псевдоматнетизм).

Для того чтобы описать распространение нейтронной волны в среде с учётом её ослабления, пользуются понятием комплексной длины рассеяния  $b = b' + ib''$ , где  $b'' = k\sigma/4\pi$  (согласно т. п. оптической теореме),  $\sigma$  — сечение всех процессов, приводящих к ослаблению пучка. Поскольку для холодных нейтронов  $\sigma$  обратно пропорц. скорости нейтрона в среде ( $\sigma \propto 1/v$ ), а  $k^{CP} = 2\pi mv^{CP}/h$ , то  $b''$  не зависит от кинетич. энергии нейтрона и является эмпирич. константой среды. Как правило,  $b'' \ll b'$ . Из-за комплексности  $b$  комплексными величинами являются  $U$  и  $n^2$ . В оптике диэлектриков и немагн. металлов комплексной является диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = n^2 = \epsilon' + i\epsilon''$ . Сопоставляя это соотношение с (2), получим для нейтронного аналога диэлектрич. проницаемости выражение:

$$\epsilon' = 1 - \frac{h^2 N b'}{4\pi m^2 v^2}; \quad \epsilon'' = \frac{h^2 N b''}{4\pi m^2 v^2}. \quad (6)$$

В Н. о.  $|\epsilon''| \gg |\epsilon'|$ . Если  $b' < 0$ , то  $\epsilon' > 0$  и вводится полная аналогия с диэлектриками. Однако для большинства материалов  $b' > 0$ . При этом  $\epsilon' > 0$  только в случае, когда энергия нейтронов не слишком мала. Если  $\epsilon' < U$ , то  $\epsilon' < 0$ , что характерно для металлов.

В оптике амплитуды отражённой ( $r$ ) и прошедшей ( $t$ ) волн (при единичной амплитуде падающей волны) определяются Френеля формулами. В Н. о. все особенности преломления и отражения связаны с нормальным к плоскости раздела компонентами скоростей  $v_1$  и  $v_2^{CP}$ . Поэтому удобно ввести «нормальный» коэф. преломления  $n_1 = v_2^{CP}/v_1 = (1 - v_0^2/v_1^2)^{1/2}$ , где  $v_0 = 2U/m$  наз. граничной скоростью среды. Тогда ф-лы Френеля будут иметь вид:

$$r = \frac{1 - n_1}{1 + n_1}; \quad t = \frac{2}{1 + n_1}. \quad (7)$$

При  $v_1 < v_0$  ( $v_0 \leq 6$  м/с) показатель преломления  $n_1$  становится миним., а коэф. отражения  $R = |r|^2 = 1$ . Это явление, как и в случае рентг. лучей, наз. полным внешним отражением. Наличие поглочения (комплексность потенциала  $U$  и соответственно  $n_1$ ) делает отражение не идеально полным, хотя из-за малости  $b''$  по сравнению с  $b'$  коэф. отражения в этом случае отличается от 1 на величину  $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ . Нейтронно-оптические методы в физических исследованиях. Анализируя дифракц. картину, возникающую при прохождении нейтронов через кристаллич. веществ-



Рис. 2. Прибор для обнаружения вярда нейтрона.

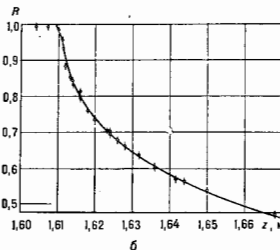
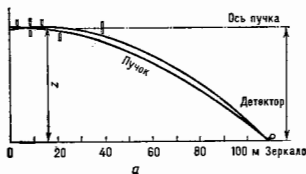


Рис. 3. а — Схема гравитационного рефрактометра; б — зависимость коэффициента отражения  $R$  от  $z$  для тяжелой воды.

ва, можно восстановить пространств. структуру элементарной ячейки кристалла (см. Нейтрография структурная). В свою очередь, монокристаллы используются как монохроматоры нейтронов. Явление полного отражения используется для создания зеркальных нейтропроводов, с помощью к-рых можно выводить нейтроны из ядерного реактора или др. нейтронного источника на достаточно большие расстояния. Т. к. пока-

затель преломления определяется не только ядерным составом среды, но и её магн. свойствами, что можно подобрать такие материалы, для к-рых полное отражение имеет место только для одной спиновой компоненты. На этом принципе основано действие поляризаторов (см. *Поляризованные нейтроны*).

В силу несохранения чётности в ядерных взаимодействиях длина рассеяния нейтрона на ядрах может зависеть от ориентации спина нейтрона относительно его импульса. Это приводит к специфич. двойному лучепреломлению, к-рое может быть обнаружено по вращению плоскости поляризации нейтронов с поперечной относительно импульса поляризации. Различные же мнимые части длины рассеяния приводит к различию в ослаблении нейтронных пучков, поляризованных вдоль и против импульса.

Практич. применение находят нейтронные призмы и линзы. Так, в эксперименте по проверке электрич. нейтральности нейтрона использовались призматич. нейтронный монохроматор (рис. 2). Монохроматич. пучок нейтронов, проходя через щель  $S_1$ , фокусируется вогнутой собирающей кварцевой

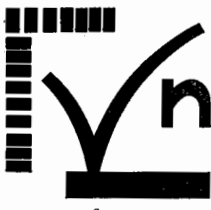
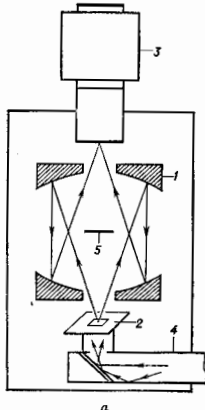


Рис. 4. а — Схема нейтронно-оптического устройства: 1 — зеркала; 2 — объект, просвечиваемый нейтронами; 3 — щель; 4 — детектор; 5 — подводящий нейтронный пучок (стрелками показано направление движения нейтронов); 6 — двукратное изображение объекта; б — объект, нанесённый в виде тонкого слоя Ni на ирениевую подложку. Так как Ni обладает значительно большей потенциальной  $U$ , чем Si, то области, покрытые Ni, отражают большую часть спектра падающих на них ультрахолодных нейтронов.



линзой ( $n < 1$ ) на щель  $S_2$ , установленную перед детектором Д. Наличие электрич. заряда у нейтрона приводило бы к смещению изображения при включении или изменении знака электрич. поля Е.

На использовании нейтронно-оптич. явлений основано большинство методов прецизионного измерения длины (амплитуды) когерентного рассеяния нейтронов  $b$ . В их числе измерение сдвига фаз в нейтронном интерферометре, когда в одно из его плеч помещён исследуемый образец; сравнение показателя преломления пос-

ледующего вещества с показателем преломления окружающей среды. В этом методе используются просветленные первоначально «мутной» (для нейтронов) взвеси частиц исследуемого вещества в растворе при постепенном изменении хим. или изотопного состава растворителя (фильтр Христиансена). Один из наиб. точных методов измерения длины рассеяния основан на прецизионном измерении граничной скорости  $v_0$  образца с помощью гранатац. рефрактометра. Измеряется зависимость коэф. отражения  $R$  нейтронов, имеющих первоначально строго горизонтальную скорость, от высоты  $z$  их падения на горизонтальное зеркало (рис. 3, а). При этом  $z$  полностью определяет нормальную к зеркалу компоненту скорости нейтронов (рис. 3, б).

Способность ультрахолодных нейтронов к полному отражению при любых углах падения позволяет хранить их в замкнутых сосудах и измерить период *бета-распада нейтрона* по изменению кол-ва нейтронов в сосуде, а также осуществить эксперименты по обнаружению электрич. дипольного момента нейтрона. Наличие этого момента свидетельствовало бы о  $T$  — инвариантности ядерных взаимодействий (см. *Нейтрон*).

Полное отражение нейтронов с большой длиной волны делает возможным создание различных оптич. устройств, в т. ч. нейтронного аналога зеркального микроскопа (рис. 4, а). Контраст в изображении объекта, создаваемый этим прибором, связан с нейтронно-оптич. свойствами вещества, т. е. с его ядерным (изотопным) составом и магн. структурой (рис. 4, б, в).

Лит.: Ю з Д. Нейтронная оптика, пер. с англ., М., 1955; Г у р е в и ч И. И., Т а р а с о в Л. В., Физика нейтронов низких энергий, М., 1965; Ф р а н к И. М., Некоторые новые аспекты нейтронной оптич., *Природа*, 1972, № 9; Нейтрон: К 50-летию открытия, М., 1983; S e a r s V. F. Thermal — neutron scattering lengths and cross sections, AECI-8480, Chalk River, Ontario, 1984; И г а т о в и ч В. К., Физика ультрахолодных нейтронов, М., 1986.

**НЕЙТРОННАЯ РАДИОГРАФИЯ** — исследование объекта методом облучения нейтронами и регистрации детектором прошедших через объект нейтронов или продуктов ядерных реакций, возникающих при облучении. Н. р. применяется гл. обр. для исследования металлов, сплавов, минералов, водородсодержащих веществ и др. с целью выявления в них неоднородностей, трещин и их пространств. распределения. Метод Н. р. основан на разной вероятности взаимодействия (поглощения, рассеяния) нейтронов с разл. ядрами. Наиб. эффективны *теплые нейтроны*, обладающие более высокими сечениями поглощения и рассеяния, что позволяет обнаруживать малые концентрации элементов (см. *Активационный анализ*).

Распространённым методом Н. р. является просвечивание объекта коллимированным пучком нейтронов. При этом определяется степень ослабления нейтронного потока в результате поглощения или рассеяния ядрами. Это позволяет судить о внутр. строении и составе объекта. Для регистрации прошедших через образец нейтронов используются экраны-преобразователи (напр., фольги из Gd, Dy, In), к-рые служат источником вторичного излучения, регистрируемого детектором. Участкам образца, содержащим элементы, сильнее поглощающие нейтроны, соответствуют более светлые места на плёчке.

Для получения изображения объекта может также использоваться излучение самого образца, возникающее в нём за счёт ядерных реакций, индуцируемых нейтронами (автордиография). При этом детектором, находящимся в контакте с образцом, регистрируются либо продукты ядерных реакций ( $\alpha$ -частицы, осколки *деления ядер*), либо продукты распада образовавшихся в образце радионуклидов. В этом случае более тёмные места на детекторе соответствуют участкам поверхности образца, содержащим ядра, сильнее поглощающие нейтроны и соответственно интенсивнее иссующие вторичное излучение.

Количеств. результаты при обработке нейтронных радиограмм получают, определяя оптич. плотность изо-



бражения на разл. участках плёнки, или подсчётом числа треков на трековом детекторе.

Лит.: Т ю ф л я к о в Н. Д., Ш т а н ь А. С., Основы нейтронной радиологии, М., 1975; Ф л е р о в Г. Н., В е р з и н а И. Г., Радиология минералов, горных пород и грун, М., 1979.

**НЕЙТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ** — совокупность исследований энергетич. зависимости разл. процессов взаимодействия нейтронов с атомными ядрами и свойств образовавшихся возбуждённых состояний ядер. Специфич. особенность взаимодействия нейтронов с ядрами связана с отсутствием заряда. Отсюда протекание реакции при низких энергиях нейтронов  $\sigma_n < 1$  МэВ.

Упругое рассеяние нейтронов ( $n, n'$ ) происходит на всех ядрах и при любых энергиях с заметной вероятностью. При  $\sigma_n$  ниже энергии первого возбуждённого уровня ядра-мишени возможны также неупругие аккректорные, ядерные реакции: радиац. захват нейтрона ( $n, \gamma$ ), реакции с вылетом протонов ( $n, p$ ) и  $\alpha$ -частиц ( $n, \alpha$ ), деление ядер ( $n, f$ ).

Характерная особенность зависимости энергетич. ядерных реакций от энергии нейтрона ( $\sigma_n$ ) — наличие резонансов (рис. 1). Каждую резонансу соответствует образование определённого состояния *составного ядра*

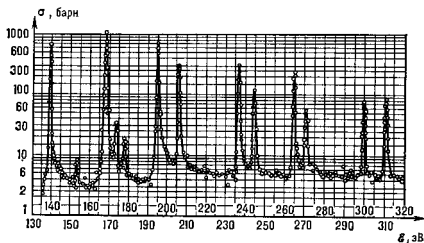
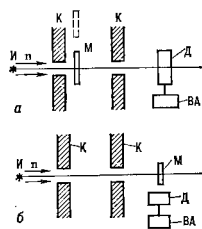


Рис. 1. Нейтронные резонансы.

(компаунд-ядра) с массовым числом  $A + 1$  ( $A$  — массовое число ядра-мишени) и энергетич. возбуждения, равной  $\sigma_{св} + \sigma_0 A / (A + 1)$ , где  $\sigma_{св}$  — энергия связи нейтрона в ядре,  $\sigma_0$  — кинетич. энергия нейтрона в максимуме резонанса. Сечение образования составного ядра  $\sigma_c$  в области резонанса описывается *Брейта — Вигнера формулой*:



$$\sigma_c = \pi \lambda^2 \frac{g \Gamma_n \Gamma}{(\sigma_n - \sigma_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

Здесь  $2\pi\lambda = \lambda = 2,86 \times 10^{-11} \sigma_n^{-1/2}$  — длина волны де Бройля нейтрона (в м),  $g$  — статистич. фактор,

Рис. 2. Схем экспериментов для измерения нейтронных сечений: а — полного, б — парциальных.

зависщий от спинового исходного и составного ядер,  $\Gamma$  — полная ширина резонанса, связанная со временем жизни  $\tau$  образовавшегося возбуждённого состояния ядра соотношением  $\Gamma = \hbar/\tau$  (для большинства ядер  $\tau \sim 10^{-14} - 10^{-18}$  с). Вероятность распада составного ядра по тому или иному каналу  $i$  определяется парциальными ширинами — нейтронной шириной  $\Gamma_n$  в случае вылета нейтрона (упругое рассеяние), радиационной  $\Gamma_\gamma$  (вылет  $\gamma$ -квантов), делительной  $\Gamma_f$  и т. д. Полная ширина равна сумме парциальных ширин для данного резонанса:

$$\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma + \Gamma_f + \Gamma_\alpha + \dots$$

Сечение реакции с распадом по каналу  $i$ :

$$\sigma_i = \sigma_n \Gamma_i / \Gamma$$

Полное нейтронное сечение:

$$\sigma_n = \sigma_n + \sigma_\gamma + \sigma_\alpha + \sigma_f + \dots$$

Эксперим. исследование зависимости  $\sigma_i(\sigma_n)$  и  $\sigma_i(\sigma_n)$  позволяет определить характеристики состояний, образующихся при захвате нейтрона: энергию, полную и парциальные ширины, спин  $J$ , чётность  $\pi$  ( $J^\pi$ ).

Нейтронный спектрометр. Для измерения энергетич. зависимости сечений применяют нейтронные спектрометры, гл. обр. спектрометры по времени пролёта (рис. 2). Импульсные источники нейтронов и генерирует нейтроны со сплюснутым энергетич. спектром в виде короткой вспышки длительностью  $\Delta t$ . При измерении полного сечения  $\sigma_n$  детектор нейтронов  $D$  регистрирует нейтроны при положении мишени  $M$  в пучке и вне пучка ( $K$  — коллиматоры, рис. 2, а). Временной анализатор ВА фиксирует интервал времени  $t$  между вспышкой источника и моментом регистрации нейтрона в детекторе. Энергия нейтрона (в эВ) связана с временем пролёта  $t$  (в мкс) соотношением  $\sigma_n = (72,3 L)^2/t^2$ , где  $L$  — расстояние между источником нейтронов и детектором (в м). Энергетич. разрешение спектрометра:

$$\Delta \sigma_n^2 / \sigma_n^2 = 2 \Delta t / t = 2 \Delta t v / L,$$

$v$  — скорость нейтронов,  $T$  и  $Q$  — фактор качества, определяемый как  $Q/(\Delta E)^2$ , где  $Q$  — интегральный выход нейтронов на источнике, характеризует поток нейтронов на детекторе при заданном энергетическом разрешении.

Нейтронными источниками обычно служат электронные или протонные ускорители с длительностью вспышки  $\Delta t \sim 10^{-9} - 10^{-8}$  с и  $Q \sim 10^{14} - 10^{16}$  нейтрон $\cdot$ с $^{-1}$ . Большим выходом нейтронов при более длинной вспышке обладают *импульсные реакторы*, применяемые также в качестве бустеров — размножителей нейтронов от импульсных ускорителей.

Полное сечение  $\sigma_n$  взаимодействия нейтрона с ядром определяется соотношением:

$$N/nN_0 = \exp(-n\sigma_n t),$$

где  $N$  — показания (счёт) детектора с мишенью в пучке,  $N_0$  — вне пучка,  $n$  — толщина мишени (число ядер на  $1 \text{ см}^2$ ). Для измерения парциальных сечений  $\sigma_i$  детектор  $D_i$ , чувствительный только к продуктам  $i$ -распада составного ядра, располагается вне пучка нейтронов рядом с мишенью (рис. 2, б). Скорость счёта детектора  $D_i$ :

$$N_i = \Pi \{ [1 - \exp(-n\sigma_i t)] \sigma_i / \sigma_n \}$$

Здесь  $\Pi$  — поток нейтронов в заданном интервале энергии, падающий на всю площадь мишени,  $\pi_i$  — эффективный коэффициент детектором продуктов реакции.

При изучении реакций с вылетом заряж. частиц (протонов,  $\alpha$ -частиц, осколков деления) используют ионизац. детекторы (ионизац. камеры, пропорциональные счётчики и т. д.) с помещёнными внутри них мишенями, расположенные непосредственно в пучке нейтронов. Это возможно благодаря низкой чувствительности таких детекторов к нейтронам и  $\gamma$ -лучам (см. *Нейтронные детекторы*).

Статистические свойства резонансов. Вероятность образования составного ядра зависит от орбитального момента  $l$  падающего нейтрона. Нейтронная ширина для разных  $l$ :

$$\Gamma_n(l) \propto \sigma_n^{1/2} (R/\lambda)^{2l}, \quad (*)$$

где  $R \approx 1,3 A^{1/3}$  фм. При низких энергиях нейтронов ( $\sigma_n \leq 1$  кэВ) наблюдаются в основном  $t$  и  $s$ -резонансы ( $l = 0$ ), значительно слабее  $p$ -резонансы ( $l = 1$ ); с

более высокими  $l$  резонансы не проявляются. С увеличением  $\epsilon_n$  роль нейтронов с большим  $l$  в образовании составных ядер возрастает. При анализе нейтронных ширин обычно исключают энергию, зависимость (\*) и оперируют с приведенными нейтронными ширинами  $\Gamma_n^l$  для  $\epsilon_n = 1$  эВ.

Для данного ядра  $\Gamma_n^l$  существенно меняются от резонанса к резонансу. Эксперим. данные о флуктуациях  $s$ -резонансов подтверждают высказанные С. Е. Портера (С. Е. Porter) и Р. Г. Томаса (R. G. Thomas) аргументы в пользу гауссовского распределения амплитуд приведенных ширин  $(\Gamma_n^s)^{1/2}$  при нулевом ср. значении. Отсюда следует т. н.  $\chi^2$ -распределение с одной степенью свободы ( $\nu = 1$ ) для  $\Gamma_n^s$  (распределение Портера — Томаса):

$$P(x) = (2\pi x)^{-1/2} \exp(-x/2),$$

$$\text{где } x = \Gamma_n^s / \langle \Gamma_n^s \rangle.$$

Аналогичными статистич. свойствами обладают и др. ширин (др. каналы распада). Распределение Портера — Томаса справедливо для ширин, характеризующих вероятность  $\gamma$ -переходов с резонансных состояний, имеющих одинаковые спины и чётность, на один и тот же уровень. Полная радиац. ширина практически не меняется от резонанса к резонансу для тяжёлых ядер, т. к. является суммой большого числа независимо флуктуирующих величин. Для  $\Gamma_n^s$  справедливо  $\chi^2$ -распределение с числом степеней свободы  $\nu \approx 50$ . Для  $\Gamma_n^s$  и  $\Gamma_n^p$  характерны  $\nu \approx 2-4$ .

Энергетич. интервалы  $D$  между соседними резонансами с одинаковыми  $l$  и  $\pi$  распределены широко:

$$P(y) = (\pi y/2) \exp(-\pi y^2/4),$$

где  $y = D/\langle D \rangle$ , причём ср. значение  $\langle D \rangle$  уменьшается с ростом  $A$  от  $10^4$  эВ для  $A \approx 30$  до 1 эВ для  $A \approx 240$ . Для соседних ядер-мишеней  $\langle D \rangle$  систематически больше для чётных  $A$  по сравнению с нечётными из-за меньшей энергии возбуждения ядра. Для магических ядер  $\langle D \rangle$  существенно возрастает.

Силовая функция. Ср. значения  $\langle \Gamma_n^s \rangle$  и  $\langle D \rangle$  коррелируют между собой: если каждая из них может отличаться для соседних ядер в десятки раз, то отношение  $S_0 = \langle \Gamma_n^s \rangle / \langle D \rangle$  наз. нейтронной силовой ф-цией, изменяется с  $A$  слабо и ниваю. Силовая ф-ция  $S_0$  имеет максимумы в областях  $A \approx 50$  и  $\approx 150$  ( $S_0 \approx 4 \cdot 10^{-4}$ ) и минимум при  $A \approx 100$  ( $S_0 \approx 3 \cdot 10^{-3}$ ).

Для  $l = 1$  силовая ф-ция  $S_1$  имеет близкие значения и максимумы при  $A \approx 100$  и  $\approx 240$ . На зависимость силовой ф-ции от  $A$  в зачатч. степени базировалась оптическая модель ядра. Силовая ф-ция непосредственно связана с усреднённым по резонансам сечением образования составного ядра. Для  $s$ -резонансов:

$$\langle \sigma_c \rangle = 2\pi k^2 V \bar{\epsilon}_n S_0.$$

Сходная зависимость справедлива для др.  $l$ .

Полное нейтронное сечение  $\sigma$ , помимо  $\sigma_c$  содержит сечение т. н. потенциального рассеяния  $\sigma_{\text{п}} = 4\pi R_0^2$ , слабо зависящее от энергии нейтронов. Величина  $R_0$  примерно равна радиусу ядра  $R = r_0 A^{1/3}$  ( $r_0 = 1,3 \times 10^{-13}$  см — размер нуклона), но на планую зависимость от  $A$  накладываются периодич. отклонения, объяснимые в рамках оптической модели ядра.

Сверхтонкие взаимодействия. Информацию о составных возбуждённых ядрах даёт также изучение т. н. сверхтонких взаимодействий в нейтронных резонансах. Магн. моменты возбуждённых состояний  $\mu_n$  ядра могут быть определены измерением сдвига  $\Delta\epsilon_0$  резонансной энергии при поляризации ядер мишени (см. Ориентированные ядра):

$$\Delta\epsilon_0 \approx j_n H (\mu_0 - \mu_n),$$

где  $j_n$  — степень поляризации ядер,  $H$  — магн. поле на ядре и  $\mu_0$  — магн. момент ядра-мишени. Однако величина  $\Delta\epsilon_0 \ll \Gamma$  ( $\Delta\epsilon_0 \approx 3 \cdot 10^{-8}$  эВ при  $j_n = 1$ ,  $H = 10^8$  Э,  $\mu_0 \approx \mu_n$ , равной одному ядерному магнетону). Это осложняет измерение и ограничивает число доступных изучению ядер. Величины  $\mu_n$  определены для ряда резонансов лавтановидов (Ть, Ву, Но и Ег). При этом ср. значение  $\langle \mu_n / I \rangle = 0,34 \pm 0,22$ , что согласуется с расчётами в рамках статистической модели ядра.

Электрич. сверхтонкое взаимодействие позволяет получить информацию об изменении распределения заряда в ядре при его возбуждении до энергии, равной энергии связи нейтрона. Т. н. хим. сдвиг нейтронного резонанса, характеризующий изменение энергии резонанса при переходе от одного хим. соединения к другому, определяется выражением:

$$\Delta\epsilon_0 = \frac{2}{3} \pi e^2 Z \Delta\rho_e(0) \Delta(r^2).$$

Здесь  $\Delta\rho_e(0)$  — разность электронных плотностей в местах нахождения ядра в этих соединениях,  $Z$  — ат. номер,  $e$  — элементарный заряд,  $\Delta(r^2)$  — изменение среднеквадратичного радиуса заряда ядра. Величина сдвига  $\Delta\epsilon_0$  того же порядка, что и в случае магн. взаимодействия. Для изотопов U оказалось, что  $\langle r^2 \rangle$  несколько меньше ( $r^2$ ), (невозбуждённого ядра) для резонансов с малой делительной шириной  $\Gamma_l$  и они примерно равны в случае  $\Gamma_l > \Gamma_l^2$ .

Несохранение чётности. В нейтронных резонансах слабое взаимодействие проявляется в виде эффектов несохранения пространств. чётности. Смешивание за счёт слабого взаимодействия состояний составного ядра с разной чётностью ( $s$ - и  $p$ -резонансы) приводит к различию в сечении  $p$ -резонанса для нейтронов с поляризованной параллельно (+) или антипараллельно (−) импульсу:

$$\sigma_{\pm}^p(\epsilon_n) = \sigma_c^p(\epsilon_n)(1 \pm \mathcal{S}).$$

Здесь  $\sigma_c^p$  — Брейта — Вигнера сечение для неопляризов. нейтронов;  $\mathcal{S}$  — коэф. асимметрии, зависящий от матричного элемента смешивания состояний разной чётности и от параметров резонансов. Экспериментально эффект был обнаружен на ядрах  $^{81}\text{Br}$ ,  $^{111}\text{Cd}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{138}\text{La}$ . Наиб. значение  $\mathcal{S} \approx 9 \cdot 10^{-2}$  наблюдалось у  $^{138}\text{La}$ .

Быстрые нейтроны ( $0.1 < \epsilon_n < 20$  МэВ). Кроме метода времени пролёта широко применяются монохроматич. пучки нейтронов, получаемые на электростатич. ускорителях в реакциях  $^2\text{H}(d, n)$ ,  $^3\text{H}(d, n)$ ,  $^7\text{Li}(p, n)$  и др. Помимо характерных для медленных нейтронов упругого рассеяния и радиац. захвата существенный вклад в сечение для средних и тяжёлых ядер дают неупругое рассеяние ( $n, p, \gamma$ ), реакции ( $p, n$ ), ( $n, \alpha$ ), а при  $\epsilon_n \geq 10$  МэВ — реакции ( $n, 2n$ ), ( $n, np$ ) и др. Отд. резонансы наблюдаются только для ядер с  $\langle D \rangle \geq 10$  кэВ, чаще изучаются усреднённое сечение.

Лит.: Пикельнер Л. Б., Попов Ю. П., Шаратов В. И., Светосильная нейтронная спектроскопия ядер, «УФН», 1982, т. 137, с. 39. Л. В. Пикельнер.

НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА — совокупность исследований строения вещества с помощью нейтронов (нейтронного излучения), а также исследования свойств самих нейтронов (их внутр. структуры, процессов распада, эл.-магн. характеристик). В Н. ф. в основном используются нейтроны с энергиями  $\epsilon_n$  от  $10^3$  эВ до  $10^7$  эВ (длины волн де Бройля  $\lambda$  от  $10^{-13}$  до  $10^{-4}$  см). Соответственно этому диапазону энергий и длин волн исследуют микрообъекты размерами от  $10^{-13}$  см при характеристич. длинах возбуждения  $10^6-10^7$  эВ (атомные ядра) до видимых в оптич. микроскоп объектов размерами  $\sim 10^{-4}$  см (напр., молекулы биополимеров). Отсутствие у нейтрона электрич. заряда и соответственно кулоновского взаимодействия с ядрами и электронами

приводит к тому, что в отличие от заряж. частиц нейтроны любых энергий обладают большой проникающей способностью. Внутри вещества нейтроны в основном взаимодействуют с атомными ядрами, а при больших энергиях — с отд. нуклонами, входящими в состав ядер, и практически не замечают электронов атомных оболочек. Характер и интенсивность нейтронно-ядерных взаимодействий существенно зависят от энергии нейтронов  $\epsilon_n$ , а также от взаимной ориентации спинов нейтрона и ядра.

Нейтроны условно разделяют на энергетич. диапазоны (табл.), отличающиеся методами получения и регистрации нейтронов, а также направлением их использования.

При любых энергиях и во всех ядрах с заметной вероятностью происходит упругое рассеяние нейтронов.

Энергетическая классификация нейтронов

Нейтроны	Энергия, эВ	Скорость, см/с	Ср. длина волны, см	Ср. темп-ра Т, К
Быстрые . . . . .	$10^6$	$10^8$	$10^{-12}$	$10^{10}$
Медленные промежуточные резонансные . . .	$10^4 - 10^5$ $0,5 - 10^4$	$10^6$ $10^7$	$3 \cdot 10^{-11}$ $3 \cdot 10^{-10}$	$10^8$ $10^6$
Тепловые . . . . .	$0,5 - 5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-8}$	300
Холодные . . . . .	$5 \cdot 10^{-3} - 10^{-7}$	$4 \cdot 10^4$	$10^{-7}$	10
Ультрахолодные	$10^{-7}$	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-3}$

Быстрые нейтроны способны испытывать на ядрах упругое рассеяние, отдавая часть своей энергии на возбуждение ядра, и вызывать эндотермич. ядерные реакции, напр. (n, 2n), (n, np), (n,  $\alpha$ ). Сечения этих реакций сравнительно плавно зависят от  $\epsilon_n$  (исключение характерно для них энергетич. порога), и их исследование позволяет изучать механизм распределения энергии возбуждения между составляющими ядро нуклонами (см. *Ядерные реакции*).

Медленные нейтроны в основном упруго рассеиваются на ядрах или вызывают экзотермич. ядерные реакции. К таким реакциям относится захват нейтрона ядром, сопровождающийся вылетом из ядра одного или неск. н-квантов (*радиационный захват*). Три др. типа ядерных реакций, энергетически выгодных для ряда ядер после захвата медленного нейтрона, — (n, p), (n,  $\alpha$ ) и деление ядер. Реакции  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ ;  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ ;  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$  используются в нейтронных детекторах, а также (за исключением первой) для защиты от нейтронного излучения. Последняя реакция применяется для иониз. получения  $^3\text{H}$ . Реакция деления вызывается медленными нейтронами только на наиб. тяжелых ядрах (U, Th и т. д.).

Термин «резонансные нейтроны» обусловлен наличием резонансных максимумов (нейтронных резонансов) в энергетич. зависимости эффективных сечений  $\sigma(\epsilon_n)$  взаимодействия нейтронов с веществом. Исследования с резонансными нейтронами дают возможность изучать спектры возбуждений ядер (см. *Нейтронная спектроскопия*). В области энергии промежуточных нейтронов резонансная структура нейтронных сечений сглаживается из-за перекрытия соседних резонансов, количество к-рых быстро увеличивается с ростом энергии возбуждения ядра. При энергии нейтрона меньше нерезонансного уровня сечение всех ядерных реакций обратно пропорционально скорости нейтрона ( $v$ ).

Энергия тепловых нейтронов сравнима с энергией тепловых колебаний атомов в конденсир. веществе (фононов), а длина волны  $\lambda$  — с межатомными расстояниями. Поэтому при прохождении тепловых нейтронов через вещество они могут существенно изменять свою энергию, приобретая или отдавая ее тепловым колебаниям атомов или молекул. По наблюдаемой величине таких изменений может быть измерен фононный спектр вещества.

При прохождении пучка тепловых нейтронов через монокристаллы отд. атомов кристаллич. решетки могут рассеивать нейтроны когерентно, что приводит к *дифракции нейтронов* — резкому увеличению рассеяния нейтронов с определенной длиной волны на нек-рый угол  $\theta$ , связанный с межплоскостным расстоянием в решетки кристалла ( $d$ ) *Брэгга — Вульфа условий*:  $\lambda = 2d \sin \theta$ . Т. о., с помощью дифракции нейтронов определяются положения атомов в кристаллах.

Наличие у нейтрона магн. дипольного момента вызывает магн. рассеяние нейтрона на атомных электронах, что даёт возможность изучать магн. структуру и динамику магн. материалов (см. *Магнитная нейтроннография*).

Холодные нейтроны используются для изучения медленных диффузионных движений атомов и молекул в разл. средах, а также для исследования белковых *макромолекул*, полимеров, микродефектов и микронеоднородности в растворах и сплавах (см. *Нейтроннография структурная*, *Неупругое рассеяние нейтронов*).

Ультрахолодные нейтроны полностью отражаются от потенциала, возникающего на границе вакуум — среда. Это отражение может быть описано при помощи показателем преломления для нейтронного пучка  $n$  с  $\lambda > 500$  А. Ультрахолодные нейтроны способны накапливаться и длит. время (сотни с) храниться в замкнутом сосуде в виде своеобразной нейтронной газа (подробнее см. *Ультрахолодные нейтроны*).

Важное место в Н.ф. занимают исследования самого нейтрона как одной из фундам. частиц, в частности выяснение, обладает ли нейтрон помимо магн. дипольного момента др. эл.-магн. характеристиками: электрич. дипольным моментом, электрич. поляризуемостью, а возможно, и очень малым электрич. зарядом (см. *Нейтрон*).

Практически во всех нейтронно-физ. исследованиях используются моноэнергетич. пучки нейтронов со степенью монохроматизации  $\sim 10^{-2}$ . Интенсивные пучки быстрых нейтронов получаются на ускорителях заряд. частиц из реакций (p, n) и (d, pn). Энергия нейтронов меняется при изменении энергии первичных заряд. частиц, падающих на мишень. Медленные нейтроны могут быть получены за счёт реакции (p, n) с нослед. замедления нейтронов. Однако в этом случае нейтронные пучки не имеют необходимой монохроматичности (см. *Нейтронные источники*).

Мощными источниками тепловых нейтронов являются спец. исследовательские *ядерные реакторы*, у к-рых внутри замедлителей потоки тепловых нейтронов достигают  $10^{18}$  нейтрон/см<sup>2</sup>·с. Моноэнергетич. тепловые нейтроны получают с помощью дифракции нейтронов на монокристаллах. Для получения холодных нейтронов используются замедлители, охлаждаемые до темп-ры жидкого азота и даже жидкого водорода (20 К). Ультрахолодные нейтроны выводят из замедлителей резко изогнутыми вакуумными *нейтронноводами*.

Универсальным методом получения монохроматич. нейтронов является т. н. метод времени пролёта, в к-ром энергия нейтрона  $\epsilon_n$  определяется по времени  $t$ , затрачиваемому нейтроном на пролёт расстояния  $L$ :

$$\epsilon_n = (72,3L/t)^2.$$

Для использования этого метода необходимы импульсные источники нейтронов.

Результаты нейтронно-физ. исследований имеют особое практич. значение в связи с проблемами ядерной энергетики, т. к. в процессах цепного деления ядер и термоядерного синтеза нейтроны играют осн. роль (см. *Управляемый термоядерный синтез*).

Лит.: Власов Н. А., Нейтроны, 2 изд., М., 1971; Гуревич И. И., Тарасов Л. В., Физика нейтронов низких энергий, М., 1965.

В. Н. Личиков.

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, см. в ст. *Активационный анализ*.

**НЕЙТРОННО-ДЕФИЦИТНЫЕ ЯДРА** — атомные ядра, имеющие меньшее число нейтронов ( $N$ ) по сравнению со стабильными ядрами с тем же  $Z$  (число протонов), наиболее распространёнными в природе. Н. я. нестабильны и испытывают *бета-распад*, сопровождающийся испусканием позитронов ( $\beta^+$ -распад) или захватом электронов с внутр. электронных оболочек (см. *Электронный захват*). По мере уменьшения числа нейтронов Н. я. становятся всё менее устойчивыми; энергия, выделяющаяся при их распаде, увеличивается, а *период полураспада* уменьшается. Н. я. получают в ядерных реакциях, приводящих к уменьшению отношения  $N/Z$ , напр., в реакциях  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, 2n)$ ,  $(p, n)$ ,  $(p, 2n)$ .

**НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫЕ ЯДРА** — атомные ядра с более высоким числом нейтронов ( $N$ ) по сравнению со стабильными ядрами с тем же  $Z$  (число протонов), наиб. распространёнными в природе. Н. я. нестабильны и испытывают *бета-распад*, испуская электроны ( $\beta^-$ -распад). По мере увеличения числа нейтронов Н. я. становятся всё менее устойчивыми; энергия  $\beta^-$ -распада возрастает, а *период полураспада* уменьшается. Обычно Н. я. образуются путём захвата нейтрона (или последоват. захвата неск. нейтронов) ядром, напр. в *ядерных реакторах*, а также при *делении ядер* тяжёлых элементов, имеющих более высокое отношение  $N/Z$ , чем ядра элементов середины периодич. системы элементов.

**НЕЙТРОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ** — приборы для регистрации и определения энергетич. спектра нейтронов. Нейтроны не обладают зарядом, зарядом и не оставляют после себя следов (треков) из ионизир. и возбуждённых частиц, появление к-рых вызывает срабатывание большинства детекторов частиц. Поэтому Н. д. всегда содержит нек-рое вещество — радиатор (конвертер), ядра к-рого при взаимодействии с нейтроном порождают заряд. частицы или  $\gamma$ -кванты. Для детектирования нейтронов используются разл. виды взаимодействия нейтронов с ядрами.

**Упругое рассеяние нейтронов на ядрах.** Нейтроны, упруго рассеивающиеся на ядрах, передают им кинетич. энергию (энергию отдачи), к-рая зависит от параметра удара, массы ядра и энергии падающего нейтрона. Для лёгких ядер ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $\text{He}$ ) доля передаваемой энергии высока. При centr. ударе нейтрон передаёт протону всю энергию. Для регистрации ядр отдачи используются обычно пропорциональные счётчики, наполненные  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $^4\text{He}$  до давлений  $p$  в в.ск. атмосф. Их эфф.коэффициент  $\eta$  велика ( $\eta \sim 10^2 - 10^4$  для  $E_n \sim 0,01 - 20$  МэВ). Этим методом можно регистрировать только нейтроны с  $E_n \gtrsim$  неск. десятков кэВ, т. е. слабую ионизацию от ядер отдачи трудно выделить над шумами аппаратуры и фоном от  $\gamma$ -квантов. Для восстановления спектра регистрируемых нейтронов необходимо измерять помимо энергии протона угол между траекториями нейтрона и протона. Это осуществляется в трековых детекторах — пропорц. и пузырьковых камерах, годоскопах счётчиков, фотоумножках и т. д.

Для детектирования нейтронов больших энергий обычно используются *сцинтилляционные детекторы* с органич. сцинтилляторами (содержащие много водорода) значит. размеров, в к-рых пробег протонов отдачи  $l$  велик (напр., при  $E_n \sim 100$  МэВ в воде  $l = 10$  см). Спектры нейтронов больших энергий измеряются по отклонению протонов отдачи в магн. поле. Однако этот метод пригоден только для интенсивных потоков нейтронов, т. е. толщина радиатора должна быть мала, чтобы в нём протонные отдачи не испытывали заметного торможения; достаточно малым должен быть и используемый телесный угол, в к-ром протоны вылетают из радиатора. Для  $E_n \sim 1$  ГэВ регистрация нейтронов по протонам отдачи становится малоэффективной, т. е. сечение упругого рассеяния, продолжая монотонно падать, становится меньше сечения *множественного рождения частиц* (см. *Множественные процессы*).

Ядерные реакции с вылетом заряженных частиц. Для детектирования нейтронов обычно применяют 3 реакции (табл.).

Сечение захвата  $\sigma$  и суммарная энергия  $Q$  заряженных частиц для  $E_n = 2,5, 3$  МэВ

Реакция	$\sigma$ , барн	$Q$ , МэВ
$^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$	5333	0,764
$^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	849	4,785
$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$	3837	2,701 7%
		2,313 93%

Пробег  $l$  в веществе  $\alpha$ -частиц и протонов малы, поэтому ядра  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$  обычно вводятся внутрь газоразрядных, сцинтилляч. и др. детекторов. Иногда радиатор в виде твёрдого хим. соединения  $^{10}\text{B}$  наносится тонким слоем на внутр. поверхность газоразрядного детектора, однако из-за сильного поглощения ядр  $^6\text{Li}$  и  $\alpha$ -частиц в самом радиаторе такие Н. д. по эффективности уступают детекторам, наполненным газообразными радиаторами  $^{10}\text{BF}_3$ ,  $^{40}\text{CSN}_2$ ,  $^3\text{He}$ . Из-за «приллипания» электронов к ионам не удаётся создать газовой Н. д. с  $p > 1$  атм. Исключение — Н. д. с  $^3\text{He}$  ( $p \leq 40$  атм.), к-рые имеют  $\eta \approx 100\%$  для тепловых нейтронов.

Цилиндрич. газоразрядные Н. д. работают в режимах *ионизационной камеры*, *пропорционального счётчика*, *Гейгера счётчика* и др. Наиб. распространён пропорц. режим, т. к. он позволяет отделить по амплитуде импульсы нейтрона от обычно сопутствующего фона  $\gamma$ -квантов. Импульс на выходе Н. д. (амплитуда  $l \sim 10$  мВ, длительность переднего фронта 1 мкс) запаздывает относительно момента захвата нейтрона на время дрейфа электронов в газе до анода (5 мкс), что определяет разрешающее время Н. д.

С увеличением  $E_n$  эфф.коэффициент падает:  $\eta \sim E_n^{-1/2}$  для  $E_n \leq 0,1$  МэВ. Поэтому при регистрации быстрых нейтронов Н. д. окружаются водородосодержащим веществом, в к-ром происходит *замедление нейтронов* (это увеличивает  $t$  до 50 мкс). В счётике Хавенса — Мак-Киббена подбором конфигурации замедлителя достигается практически постоянная  $\eta$  в диапазоне  $E_n \sim 10$  кэВ — 5 МэВ. Энергию детектируемых нейтронов в диапазоне энергии  $0,1 - 2$  МэВ можно определить с помощью пропорционального счётчика, наполненного  $^3\text{He}$  по смещению нива амплитудного распределения, соответствующего энергии, выделяемой при реакции  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ ,  $Q = 0,764$  МэВ.

При высоких плотностях  $^3\text{He}$  не для регистрации  $k$  и  $t$  используются сцинтилляч. детекторы, причём сцинтиллятором служит сам  $^3\text{He}$ . Это приводит к сокращению  $t$  до 10 нс. Сцинтилляч. метод применяется и для регистрации продуктов реакций  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ,  $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ . При этом порошок  $^{10}\text{B}$  или соединения  $^6\text{Li}$  смешиваются с порошком сцинтиллятора  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Т. к. такая смесь слабопрозрачна, то её можно использовать только в тонких слоях, т. е. для тепловых нейтронов. Более прозрачны беродержащие жидкие и пластич. сцинтилляторы и литвиевые стекла.

**Деление ядер под действием нейтронов.** Разлетающиеся осколки деления, обладая большой энергией ( $\sim 80$  МэВ на 1 осколок), образуют на выходе Н. д. импульсы с амплитудой в 50—100 раз большей, чем в предыдущих случаях. Радиаторами служат  $^{235}\text{U}$  (сечение деления для тепловых нейтронов  $\sigma_f = 533$  барн),  $^{238}\text{U}$  ( $\sigma_f = 580$  барн),  $^{239}\text{Pu}$  ( $\sigma_f = 750$  барн). Внутр. поверхность позизац. камеры покрывается тонким слоем делющихся веществ (камера деления). Т. к. пробег осколков в радиаторе мал ( $8 \text{ м.г.см}^{-2}$ ), то даже для толстого слоя  $^{238}\text{U}$  эфф.коэффициент  $\eta \leq 0,1\%$  для тепловых нейтронов. Для увеличения  $\eta$  камеры делаются многослойными (до 20 слоев). Для снижения состава. фона от спонтанного  $\alpha$ -распада делющихся ядер оптимизируют давление газа в камере и расстояние

между электродами (прогеби I у осколков меньше, чем у  $\alpha$ -частиц, и плотность ионизации для них в начале трека больше, чем в конце, а для  $\alpha$ -частиц — наоборот). Для медленных нейтронов  $\eta \sim \epsilon^{-1/2}$  и имеет резонансные максимумы в области  $\epsilon_n \sim 0,5-100$  эВ. Для быстрых нейтронов эффективность камер деления ещё меньше ( $\sim 10^{-6}$  на 1 слой). Быстрые нейтроны удобнее регистрировать радиаторами из  $^{238}\text{U}$  или  $^{232}\text{Th}$ , у к-рых  $\sigma_f$  для тепловых нейтронов  $< 10^{-8}$  барн (см. Деление ядер).  
Наиб. простой способ регистрации осколков и их пространств. распределений — по дефектам образованных осколками в приповерхностных слоях нек-рых твёрдых прозрачных материалах (см. Дилектрический детектор). Т. к. эффективность у камер деления низкая, они используются для детектирования интенсивных потоков нейтронов, напр. в системах управления ядерными реакторами.

Радиационный захват нейтронов ( $n, \gamma$ ) стабильными ядрами (практически всеми и при любых  $\epsilon_n$ ) сопровождается мгновенным  $\gamma$ -излучением ( $\tau \sim 10^{-14}$  с). При  $\epsilon_n \sim 1-10$  МэВ Н. д. имеет радиатор, содержащий ядра с большим сечением реакции ( $n, \gamma$ ), окружающей синцилляции, детекторами  $\gamma$ -лучей. Нейтроны с  $\epsilon_n$  до неск. десятков кэВ детектируют по мягким  $\gamma$ -лучам ( $\epsilon_\gamma = 478$  кэВ) от реакции  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ . Регистрация  $\gamma$ -квантов позволяет использовать толстые радиаторы;  $\eta \sim 1\%$ . Для резонансных нейтронов удобен Н. д. с радиатором, содержащим смесь ядер лантаноидов, обладающих большим сечением  $\sigma(n, \gamma)$ , с небольшим кол-вом воды. Замедление нейтронов в воде позволяет сгладить зависимость  $\eta(\epsilon_n)$ , имеющую без воды вид частотка из множества отд. максимумов (нейтронные резонансы, см. Нейтронная спектроскопия). Ядра лантаноидов после захвата нейтрона излучают каскад  $\gamma$ -квантов. Это позволяет, включая отд. секции синцилляции, детектора  $\gamma$ -квантов в схему совпадений, снизить фон при  $\eta \sim 30\%$  и  $\tau \sim 10^{-6}-10^{-7}$  с.

Радиоактивные индикаторы. Захват нейтрона стабильными ядрами часто приводит к образованию  $\beta$ -активных ядер. Облучённые нейтронами вещества (индикаторы) в виде тонких фольг (Au, In, Ag, Cu и т. д.) помещаются перед детектором  $\beta$ -частиц. Если период полураспада  $T_{1/2}$  значительно больше времени облучения индикатора, то по величине  $\beta$ -активности можно определить кол-во нейтронов, попавших в индикатор за время облучения. Измерения абс.  $\beta$ -активности требуют знания телесного угла, поглощения и рассеяния  $\beta$ -частиц в самом индикаторе и стёклах детектора. Для отст. измерений нейтронных потоков достаточно ограничиться измерениями  $\beta$ -активностей индикаторов в той же среде, условиях. Так измеряют, напр., пространств. распределение нейтронов в активной зоне реактора. Для измерения интенсивности слабых нейтронных потоков пользуются радиоимпеч. методом, основанном на Сциллара — Чалмерса эффекте. Для детектирования быстрых нейтронов используются реакции ( $n, p$ ); ( $n, 2n$ ); ( $n, \alpha$ ), пороги к-рых  $\sim 10$  МэВ, а сечения  $\sim 0,5$  барн, приводящие к образованию  $\beta$ -активных ядер. Бета-распад короткоживущих ядер радиатора ( $T_{1/2} \lesssim 1$  с) вызывает электрич. ток в т. п. датчиках с прямой  $\alpha$  зарядки и, применяемых для детектирования интенсивных потоков нейтронов.

Детектирование ультрахолодных нейтронов ( $\epsilon_n < 5-10^{-8}$  эВ) затруднено тем, что такие нейтроны эффективно отражаются от поверхности радиаторов, проникая вглубь на малую глубину ( $\sim 150$  А), на к-рой вероятность захвата нейтрона незначительна. Поэтому их предварительно ускоряют в гравитаци. и магн. полях, механч. ударом от движущихся поверхностей или с помощью неурукого рассеяния на ядрах Н. Отражение нейтрона становится несущественным, если детектор движется навстречу нейтрону со скоростью, намного превышающей скорости нейтронов. При этом детектируются нейтроны сколь угодно малых энергий, т. е.

практически «столые» нейтроны с  $\eta \sim 100\%$  (см. Ультрахолодные нейтроны).

Детектирование нейтронов сверхвысоких энергий ( $\epsilon_n > 1$  ГэВ) осуществляется т. н. адронным калориметром с установленным перед ним магнитом, после к-рого «очищает» пучок нейтронов от фона зарядж. частиц. Импульс от калориметра пропорц.  $\epsilon_n$  с разрешением по энергии  $\Delta \epsilon_n \sim 0,8\epsilon_n^{1/2}$  при  $\eta \sim 100\%$ . Идентификация нейтрона происходит по сравнительно схеме антисовпадения калориметра с установленным перед ним детектором зарядж. частиц (синциллятор, пропорц. камера и т. д.) и по форме ливня (эл.-магн. ливня, вызванные  $\gamma$ -квантами таких же энергий, значительно плотнее и уже адронных, см. Ионизационный калориметр).

Пространственное распределение нейтронов измеряется системами идентичных Н. д. или детекторами, в к-рых координата попадания нейтрона определяется по амплитуде, фронту или длительности электрич. сигнала. Такие системы бывают одно- и многомерные и осаждаются малым ЭВМ.

Лит. см. при ст. Нейтронная физика, Детекторы. А. В. Стрелков.

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ — сверхплотные звёзды, вещество к-рых состоит в основном из нейтронов. Существование Н. а. было предсказано в 30-х гг. 20 в., вскоре после открытия нейтрона. Однако только в 1967 они были обнаружены в виде импульсных источников радиозлучения — пульсаров. Затем было установлено, что Н. з. входят в состав век-рых двойных звёзд, где они проявляют себя как релаксационные пульсары (открыты в 1971), как квазипериодич. всплывшие источники рентг. излучения — барстеры (1975) и как источники редких аperiодич. рентг. всплывч. транзиентов. Неск. десятков ярких квааистационарных источников рентг. излучения в Галактике, возможно, также связаны с Н. з. в двойных системах. На одной из стадий существования Н. а. являются, по-видимому, источниками космич. гамма-всплесков. К 1987 открыто ок. 1000 Н. з., из них ок. 400 в виде обычных радиопульсаров, ок. 20 в виде рентг. пульсаров, ок. 50 в виде барстеров и транзиентов и ок. 400 в виде источников гамма-всплесков.

Плотность и масса Н. а. Теория строения звёзд приводит при известных физ. свойствах звёздного вещества к однозначной зависимости массы холодной, неврацающейся и немагн. звёзды от её центр. плотности  $\rho_c$ . На графике этой зависимости (рис. 1) можно выделить два участка, соответствующие устойчивым равновесным

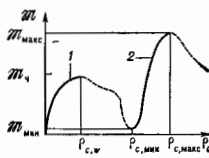


Рис. 1. Качественный вид зависимости массы  $M$  холодной звезды от их центральной плотности  $\rho_c$  (по горизонтальной оси масштаб не выдержан). Устойчивые конфигурации изображены жирными сплошными линиями, неустойчивые — штриховыми линиями. 1 — белая карлика, 2 — нейтронные звёзды.  $\rho_{c,w}$  — предел Чандрасекара для белых карликов.

состояниям звёзд с резко различающимися значениями  $\rho_c$ . Участок  $\rho_c < \rho_{c,w}$  описывает белые карлики, а участок  $\rho_{c,w} < \rho_c < \rho_{c,max}$  — Н. а. Плотность Н. а. монотонно уменьшается от центра к периферии, тем не менее плотность большей части вещества близка по порядку величины к плотности атомных ядер ( $\rho_n = 2,8 \cdot 10^{14}$  г/см $^3$ ).

Внутр. строение Н. з. определяется гл. обр. зависимостью давления  $P$  холодного вещества от  $\rho$ , т. е. уравнением состояния  $P(\rho)$  при  $T = 0$ К, а также условиями гидростатич. равновесия вещества с учётом эффектов общей теории относительности (ОТО). Эффекты, связанные с распределением темп-ры и др. специфич. свойств Н. з., учитываются в послед. более адекватных приближениях теории строения Н. з. Именно осьцы ОТО:

способность звезды создавать гравитат. поле и искривление пространства при наличии сильного гравитат. поля, — определяют существование макс. массы  $M$ . з.  $M_{\text{макс}}$  при конечной центр. плотности  $\rho_{\text{с,макс}}$ . Значения  $M_{\text{макс}}$  и  $\rho_{\text{с,макс}}$  зависят от вида у-ион. состояния при сверхядерных плотностях  $\rho \geq \rho_{\text{н}}$ , поскольку существует вещество  $N$ . з. с массой, близкой к  $M_{\text{макс}}$ , оказывается сжатой именно до таких больших плотностей. Определение  $P(\rho)$  в этом случае представляет очень сложную задачу ядерной физики и физики элементарных частиц, для решения к-рой необходимы детальные сведения о взаимодействиях нейтронов, протонов и появляющихся при сверхядерных плотностях мезонов и гиперонов. Различные реалистич. модели сверхплотного вещества приводят к  $M_{\text{макс}} = (1,4 - 2,7) M_{\odot}$  и  $\rho_{\text{с,макс}} = (1,4 - 6) \cdot 10^{14}$  г/см<sup>3</sup> соответственно (масса Солнца  $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{33}$  г). Без учёта упомянутых эффектов ОТО и в предположении, что  $P(\rho)$  определяется при любых плотностях свойствами вырожденного газа взаимодействующих нейтронов, масса  $N$ . з. была бы ограничена значением  $M_{\text{макс}} = 5,73 M_{\odot}$  — т. н. *Чандрасекара пределом* для нейтронного газа, причём  $M_{\text{макс}}$  соответствовала бы бесконечной центральной плотности. Решение задачи о структуре  $N$ . з. с тем же у-ион. состоянии газа нейтронов, но в рамках ОТО даёт  $M_{\text{макс}} \approx 0,7 M_{\odot}$  и  $\rho_{\text{с,макс}} \approx 6 \cdot 10^{15}$  г/см<sup>3</sup>. В данном случае эффекты ОТО уменьшают предельную массу  $N$ . з. более чем в 8 раз.

Эксперим. данные физики высоких энергий показывают, что с уменьшением расстояния между нуклонами ядерные силы притяжения сменяются силами отталкивания. Поэтому при плотностях  $\rho \geq \rho_{\text{н}}$  давление вещества  $N$ . з. оказывается больше, чем газа взаимодействующих нейтронов, т. е. способность звёздного вещества противодействовать сжимающей его силе тяжести увеличивается. В результате  $M_{\text{макс}}$  повышается до указанных выше пределов  $(1,4 - 2,7) M_{\odot}$ . Кроме того, отталкивание нуклонов с избытком компенсирует эффект, замедляющий рост давления с увеличением плотности, — рождение новых частиц (мезонов, гиперонов). Разброс предсказываемого значения  $M_{\text{макс}}$  связан с трудностью построения количеств. теории сверхплотного вещества.

Мин. масса  $N$ . з.  $M_{\text{мин}} \approx 0,1 M_{\odot}$  ( $\rho_{\text{с,мин}} \approx 2 \cdot 10^{14}$  г/см<sup>3</sup>). Плотность вещества внутри  $N$ . з. с массами, близкими к  $M_{\text{мин}}$ , меньше ядерной. Используемое в этом случае у-ион. состояние основывается на богатом эксперим. материале и поэтому даёт достаточно точное значение  $M_{\text{мин}}$ . Сам факт существования мин. массы  $N$ . з. связан с тем, что при низких плотностях нейтроны в силу подверженности *бета-распаду* ( $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$ ) уже не могут быть преобладающим компонентом вещества. При характерных для  $N$ . з. (в случае  $M > M_{\text{мин}}$ ) высоких плотностях нейтроны устойчивы и не распадаются, поскольку уже небольшой примеси протонов ( $p$ ) и электронов ( $e^-$ ) достаточно, чтобы в соответствии с *Паули принципом* эти частицы восприняли распад остальных нейтронов.

Структура  $N$ . а. Радиусы  $N$ . з. уменьшаются с ростом массы от  $R \approx (100 - 200)$  км при  $M \approx M_{\text{мин}}$  до  $R \approx 7$  —  $(7 - 14)$  км при  $M \approx M_{\text{макс}}$ . Осн. характеристики типичной  $N$ . з. приведены в таблице, а её структура изображена на рис. 2.

Разброс величин в табл. отражает неопределённость у-ион. состояния сверхплотного ( $\rho \geq \rho_{\text{н}}$ ) вещества. Мин. период вращения соответствует равенству гравитат. и центробежной сил на экваторе звезды. В сильном гравитат. поле  $N$ . з. становится заметным т. н. гравитат. красное смещение  $z$  — относит. увеличение всех длин волн эл.-магн. излучения с поверхности  $N$ . з., регист-



рируемых далёким наблюдателем [энергия соответствующих фотонов уменьшается в  $(1+z)$  раз]. Определение  $z$  для  $N$ . з. по их рентг. и гамма-спектрам (именно в этих диапазонах эл.-магн. волн можно ожидать наиб. интенсивного излучения поверхности  $N$ . з.) представляет собой очень важную, хотя и трудную, задачу совр. астрономии. В силу соотношения  $1+z = 1/\sqrt{1 - r_g/R}$  значение  $z$  определяет один из гл. параметров  $N$ . з. — отношение *гравитационного радиуса*  $r_g = 2GM/c^2$  (здесь  $G$  — гравитат. постоянная) к фактич. радиусу  $R$ . Др. важный параметр — гравитат. *дефект массы*  $\Delta M$  — может быть в принципе измерен методами нейтринной астрономии (см. *Нейтронная астрофизика*), поскольку соответствующая ему энергия  $\Delta M c^2$  выделяется в процессе образования  $N$ . з. преим. в виде нейтрино (и антинейтрино) всех трёх типов.

Самые наружные слои не очень молодой и успешной достаточно юной  $N$ . з. состоят, по-видимому, из Fe с возможной примесью Cr, Ni. Со, к-рые образуют твёрдую внеш. кору звезды (рис. 2). Плотность вещества быстро увеличивается и глубь звезды и уже на глубине неск. сотен метров достигает  $4 \cdot 10^{11}$  г/см<sup>3</sup>. При такой плотности осн. компонентом вещества оказываются ядра железа и соседних с ним элементов в таблице Менделеева, сильно переобитаемые нейтронами. Поэтому под внеш. корой  $N$ . з. должна находиться твёрдая насыщенная нейтронами внутр. кора, к-рая граничит с жидким ядром, состоящим в осн. из вырожденных нейтронов с малой примесью вырожденных протонов и электронов. Если центр. плотность  $N$ . з. превышает  $\sim 10^{12}$  г/см<sup>3</sup>, то близк центра звезды известно содержит помимо нуклонов и электронов также мезоны, гипероны и др. элементарные частицы. Свойства сверхплотного вещества при  $\rho > \rho_{\text{н}}$  пока ещё известны недостаточно точно. Теоретич. расчёты показывают, что близк центра  $N$ . з. (особенно звёзд с  $M \approx M_{\text{макс}}$ ) возможны такие эффекты, как появление ионного конденсата, переход нейтронной жидкости в твёрдое кристаллич. состояние и даже образование кварк-глюонной и гиперновой плазмы. Большое значение для физики  $N$ . з. имеет *сверхтекучесть* нейтронного компонента звёздного вещества, возможная в жидком ядре и во внутр. коре, а также *сверхпроводимость* протонного компонента при плотностях, близких к ядерным.

**Образование  $N$ . з.** происходит в процессе *гравитационного коллапса* на конечных стадиях эволюции достаточно массивных обычных звёзд (см. *Эволюция звёзд*). Медленная, длительно десятки и сотни млн. лет эволюция массивных равновесных звёзд (с массой, по крайней мере в неск. раз превышающей  $M_{\odot}$ ) может привести к тому, что масса их центр. областей, сильно сжавшихся и истеривших запасы ядерного горючего,

Основные характеристики типичной нейтронной звезды с массой  $M = 1,3 M_{\odot}$

Радиус	$R = 16 - 8$ км
Гравитат. радиус	$r_g = 2GM/c^2 = 3,9$ км
Плотность в центре	$\rho_c = 4 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ г/см <sup>3</sup>
Мин. период вращения	$T_{\text{мин}} = (10 - 3) \cdot 10^{-4}$ с
Момент инерции	$I = (2 - 0,6) \cdot 10^{44}$ г·см <sup>2</sup>
Гравитат. красное смещение	$z = 0,15 - 0,39$
Гравитат. дефект массы	$\Delta M = (0,08 - 0,18) M_{\odot}$ $c^2 \cdot \Delta M = (1,4 - 3,2) \cdot 10^{48}$ эрг

в нек-рой момент времени окажется больше предела Чандрасекара  $M_{\text{ч}} \approx 1,4 M_{\odot}$  для белых карликов. В таком состоянии центр области звезды не могут существовать долго — охлаждение и продолжающееся увеличение их массы нарушают баланс между силами тяжести и силами давления. В результате очень быстро (за неск. секунд или долей секунды) центр области звезды сжимаются до ядерных плотностей, подвергаясь одновременно процессу *нейтронизации вещества*, — рождается нейтронная звезда. Массы образовавшихся таким путём Н. з. могут находиться в пределах  $M_{\text{н.з.}} \leq M_{\text{н.з.}} \leq M_{\text{манс.}}$ . В случае, когда появление Н. з. сопровождается вспышкой *сверхновой звезды*, значит, часть массы звезды выбрасывается в космос. Пространство, что указывает на возможность образования Н. з. с массами  $M_{\text{н.з.}} < M_{\text{ч}}$ . Но образованию Н. з., по-видимому, не всегда сопутствует вспышка сверхновой звезды (возможен «тихий» коллапс). Другую возможность появления Н. з. представляет эволюция белых карликов в тесных двойных звездных системах. Перетекание вещества со звезды-компаньона на белый карлик постепенно увеличивает его массу, и, когда она достигает  $M_{\text{ч}}$ , белый карлик превращается в Н. з. В этом случае  $M_{\text{н.з.}} \leq M_{\text{манс.}}$  (знак неравенства учитывает гравитационный дефект массы, а также возможный сброс внеш. слоёв белого карлика). В случае, когда перетекание вещества продолжается и после образования Н. з., её масса может со временем значительно увеличиться. При  $M_{\text{н.з.}} > M_{\text{манс.}}$  Н. з. теряет устойчивость и в результате релятивистского гравитационного коллапса превратится в *чёрную дыру*.

Сильное сжатие центр. областей звёзд при переходе их в Н. з. (уменьшение радиуса более чем в 100 раз) сопровождается, в силу законов сохранения момента кол-ва движения и магн. потока, резким возрастанием скорости вращения и величин магн. поля. Тем самым получают естеств. объяснение быстрое вращение пульсаров и их сильные магн. поля по сравнению с обычными звёздами и белыми карликами. Происхождение сильных магн. полей пульсаров ( $10^{10} - 10^{13}$  Г) может быть связано также с к. л. механизмами их возбуждения (напр., с термомангнитными эффектами). Однако центробежные и магн. силы у наблюдавшихся до сих пор пульсаров не столь велики, чтобы существенно влиять на их общую структуру. Поэтому строение Н. з. обычно рассматривают без учёта этих эффектов (напр., пренебрегают отклонениями от сферич. симметрии), а роль магн. поля и вращения учитывают в разл. процессах переноса энергии внутри и вблизи поверхности Н. з. (*излучное излучение, синхротронное излучение, нейтринное излучение, лучистый перенос энергии и электрона проводимость*).

Частота образования Н. з. пока ещё не известна с желаемой точностью, что связано с неопределённостями как в теории эволюции звёзд, так и в статистике пульсаров. Обычно принимают, что в Галактике одна Н. з. возникает в среднем раз в 10—30 лет. Поскольку возраст Галактики  $\sim 10^{10}$  лет, то в ней должно содержаться около миллиарда Н. з. К настоящему времени зарегистрирована лишь ничтожная часть Н.з. Галактики.

Важнейшие направления исследования Н.з. Определение масс Н. з. в тесных двойных системах (двойные пульсары, рентг. пульсары, барстеры) показало, что их наиб. вероятные значения лежат в пределах  $(1-2)M_{\odot}$ . Однако неопределённости в значениях  $M_{\text{н.з.}}$  ещё велики: для нек-рых Н. з. не исключены массы  $0,5 M_{\odot}$  и  $3 M_{\odot}$ . По-видимому, наиб. точно определена  $M_{\text{н.з.}}$  для радиопульсара PSR 1913 + 16 в двойной системе:  $M_{\text{н.з.}} = (1,41 \pm 0,06) M_{\odot}$ .

Систематич. измерение периодов радиопульсаров (т. е. периодов вращения  $T$  Н. з.) показало, что вращение пульсаров постепенно замедляется. Замедление связано с превращением кинетич. энергии вращения в энергию излучения пульсаров. Однако на фоне почти

монотонного возрастания  $T$  случаются небольшие скачкообразные изменения периода, а также наблюдаются совсем малые хаотич. вариации  $T$ .

Наб. простое объяснение таких скачков и вариаций сводится к следующему. Постепенное увеличение  $T$  сопровождается изменением центробежной силы и накоплением напряжений в твёрдой коре пульсаров, что время от времени вызывает растрескивание коры, а иногда крупные разломы и звездотрясения. В результате соответствующих изменений момента инерции коры и происходят скачкообразные сбросы и незначит. вариации периодов вращения, характерные времена релаксации  $k$ -рых определяются степенью «сцепления» коры и сверхтекучего ядра Н. з.

Однако из последующего детального изучения данных наблюдений стало ясно, что происхождение и временное поведение изменений  $T$  имеет, по-видимому, более сложную связь со сверхтекучестью имеющихся в звезде нейтронов (как свободных, так и связанных в атомных ядрах). Вращение Н. з. приводит к появлению в их сверхтекучем веществе множества квантованных вихрей. Такие вихри сложным образом взаимодействуют с нормальными (не сверхтекучими) компонентами вещества и с кристаллич. решёткой внеш. коры Н. з. При этом могут развиваться коллективные процессы (не обязательно идишированные звездотрясениями),  $k$ -рые сопровождаются перераспределением момента кол-ва движения между твёрдой корой и ядром Н. з. (момент инерции коры составляет лишь  $10^{-1} - 10^{-2}$  от полного момента инерции Н. з.). Наблюдения временных характеристик изменений периода радио- и рентг. пульсаров содержат важную информацию о сверхтекучести вещества Н. з., о свойствах их коры и о физ. условиях в их недрах. Напр., соответствующие данные для пульсара в Крабовидной туманности позволили оценить темп-пу в центре Н. з.  $T_c \approx 4 \cdot 10^8$  К.

Наблюдения в рентг. диапазоне около десятка молодых *остатков вспышек сверхновых* звёзд в нашей Галактике, в  $k$ -рых либо присутствуют достаточно горячие Н. з. (Крабовидная туманность, туманность в созвездии Парусов), либо можно ожидать их присутствия, позволили установить верх. пределы для *эффективных температур*  $T_{\text{эф}}$  этих Н. з. Пределы оказались близкими к  $(1-2) \cdot 10^6$  К. В частности, для пульсара в Крабовидной туманности и туманности в Парусах, а также для Н. з., предпологаемой в остатке сверхновой RCW 103, было получено  $T_{\text{эф}} < 2,0 \cdot 10^6$  К,  $1,5 \cdot 10^6$  К и  $2,2 \cdot 10^6$  К соответственно. Не исключено, что в этих трёх случаях верх. пределы близки к реальным значениям  $T_{\text{эф}}$ .

Теория охлаждения Н. з. в общем согласуется с данными наблюдений. Скорость охлаждения Н. з. зависит от влияния на механизмы переноса энергии и теплоёмкость её вещества сверхтекучести, сверхпроводимости, магн. поля и ряда др. свойств вещества в сверхплотном состоянии. Поэтому сопоставление теории остывания Н. з. с будущими более тонкими наблюдениями обещает стать одним из эфф. способов исследования структуры Н. з. и физ. свойств ядерной материи.

Большие перспективы в изучении Н. з. связываются с успехами нейтринной астрономии,  $k$ -рая в принципе позволяет определять параметры мощной вспышки нейтринного излучения, сопровождающего рождение Н. з. Впервые такой всплеск нейтринного излучения был зафиксирован подземными нейтринными детекторами в момент вспышки сверхновой в Большом Магеллановом Облаке 23 февр. 1987. Измерения нейтринного излучения позволяют не только непосредственно измерять дефект массы нейтронных звёзд, но и проследить за самим процессом образования нейтронных звёзд.

Изучение Н. з. превратилось в одну из самых увлекательных и богатых открытиями областей астрофиз.

вики. Экстремальные физ. условия в Н. а. делают их уникальными естеств. лабораториями, представляющими обширный материал для исследования физики ядерных взаимодействий, элементарных частиц и теории гравитации.

Лит.: Гинзбург В. Л., О физике и астрофизике, 3 изд., М., 1980; Зельдович И. Б., Новиков И. Д., Теория тяготения и эволюции звезд, М., 1971; Шакура Н. И., Нейтронные звезды и черные дыры в двойных звездных системах, М., 1976; Смит Ф. Г., Пульсары, пер. с англ., М., 1978; Манчестер Р., Тейлор Дж., Пульсары, пер. с англ., М., 1980; Шварцшильд С., Тяготелески С. Черные дыры, Бельгия: Хардинг и нейтронные звезды, пер. с англ., т. 1—2, М., 1985.

Д. К. Набеляк.

**НЕЙТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ** — устройства для получения нейтронных пучков. Действие всех типов источников основано на использовании ядерных реакций, сопровождающихся вылетом нейтронов. Н. и характеризуются интенсивностью (число нейтронов в с), энергетическими и угловыми распределениями, степенью поляризации нейтронов (см. *Поляризованные нейтроны*) и режимом испускания (непрерывным или импульсным).

Простейшие Н. в. (радиоизотопные) содержат либо спонтанно делящиеся ядра (напр.,  $^{252}\text{Cf}$ ), либо однородную смесь порошков Вe и  $\alpha$ -активного нуклида ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), излучающую нейтроны в результате реакции  $^{238}\text{U} + \text{He} \rightarrow \text{C} + \text{n}$ . Макс. мощность таких Н. в. ( $\sim 10^8$  нейтрон/с) ограничена допустимой активностью радиоакт. препаратов. Достоинством радиоизотопных Н. в. — малые габариты, простота и стабильность (хотя мощность источника плавно падает в соответствии с периодом полураспада радиоакт. нуклида). Их недостатки, кроме низкой мощности, — широкий энергетич. спектр нейтронов (0,1 — 12 МэВ) и высокий уровень сопровождающего  $\gamma$ -излучения.

Более мощные Н. в., исчисляющие  $10^7 - 10^{13}$  с $^{-1}$ , — небольшие зал.-статич. ускорители, в к-рых ядра дейтерия  $^2\text{H}$ , ускоренные до энергий  $\sim 200$  кэВ, бомбардируют мишень, содержащую тритий  $^3\text{H}$ . В результате реакции  $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$  образуются практически моноэнергич. нейтроны с энергией  $\sim 14$  МэВ. Такие Н. в. используются для нейтронного *актинохимического анализа*, нейтронного короткажа, *нейтронорафии*.

Еще более мощные Н. в. являются исследовательские *ядерные реакторы*, исчисляющие  $5 \cdot 10^{18}$  с $^{-1}$  на каждый МВт мощности реактора. Реактор как Н. в. обычно характеризуется не полным кол-вом испускаемых нейтронов, а макс. плотностью  $N$  их потока (яркость) внутри активной зоны или замедлителя реактора. В исследовательских реакторах  $N$  достигает  $10^{18}$  с $^{-1}$  с  $1 \text{ см}^2$ . Хотя в реакции *деления ядер* ср. энергия образующихся нейтронов  $\sim 2$  МэВ, в результате замедления нейтронов в конструкц. элементах и замедлителе спектры нейтронов обычно сильно обогащен тепловыми нейтронами (максимум в области 0,06 эВ). Ещё большая яркость  $\sim 10^{17}$  с $^{-1}$  с  $1 \text{ см}^2$  (в импульсе длительностью 100 мкс) достигается в *импульсных реакторах*.

Высокая плотность потока нейтронов получается также при использовании мощных электронных или протонных ускорителей (см. *Нейтронный генератор*).

В. И. Луциков.

**НЕЙТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР** — установка для получения нейтронных пучков высокой интенсивности, состоящая из *сильноточного ускорителя* заряд. частиц (протонов, дейтронов, электронов) и мишени — конвертора. Интенсивные импульсные потоки нейтронов получают с помощью протонных ускорителей — т. е. *мезонных фабрик*, в к-рых нейтроны непосредственно выбиваются протонами из ядер. При энергии протонов 1 ГэВ каждый протон выбивает из урановой мишени до 30—50 нейтронов. Напр., Лос-Аламосская мезонная фабрика (США) с накопит. кольцом генери-

рует пучки нейтронов (при длительности импульса 250 пс и частоте повторения 12 Гц) интенсивностью ок.  $10^{18}$  с $^{-1}$ .

Генерирование мощных нейтронных потоков предусматривается также в нек-рых проектах коаксных (адронных) фабрик. Так, в адронной фабрике в Японии планируется, в частности, получение потока нейтронов в надтепловой и холодной областях спектра (на единичный интервал энергии) в ср. более  $10^{17}$  см $^{-2}$  с $^{-1}$  зв $^{-1}$ , а в ультралоидной области более  $10^8$  с $^{-1}$  с $^{-1}$ .

В электронных ускорителях нейтроны получают в результате фотонейтронной реакции ( $\gamma, n$ ) от тормозного излучения электронов, падающих на вольфрамовую или урановую мишень. При энергии электронов 30 МэВ генерируется 1 нейтрон на 100 электронов. Наиб. крупным электронным ускорителем, используемым для получения интенсивных импульсных потоков нейтронов (до  $3 \cdot 10^{14}$  с $^{-1}$ ), является линейный ускоритель «ORFEL» (Ок-Ридж, США) с энергией электронов 140 МэВ, импульсным током до 20 А, длительностью импульса 7—20 нс, частотой повторения  $10^3$  Гц.

Перспективы Н. г. на основе мощных *линейных ускорителей* протонов и дейтронов на энергии  $\sim 1,6$  ГэВ с током 0,1 — 1 А. В мишенях таких Н. г. реализуются ядерные реакции расщепления дейтрона на протон и нейтрон, к-рые дают высокий выход нейтронов и возможность управления их потоками. Напр., при токах протонов  $\sim 100$  мА энергии 1 ГэВ на мишенях из Pb, Bi, U генерируются потоки нейтронов до  $10^{19}$  с $^{-1}$ . Н. г. типа предполагается использовать для исследования радиационной стойкости материалов, исследований в области ядерной физики и химии. Обсуждаются возможности их применения с мишенями на делящихся материалах для получения ядерного горячего ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$ ) в пром. масштабах. Мощные Н. г. предполагается также использовать для перевода долгоживущих радионуклидов, содержащихся в «отходах» ядерных реакторов, в короткоживущие (трансмутац. и), для «сваробки» трития (через мишень, содержащую отходы, прокачивают жидкий Li), а также для получения трансурановых элементов (напр.,  $^{253}\text{Cf}$ ).

Лит.: Технологические аспекты ядерных энергетических систем с воспроизводством топлива, под ред. Г. Баура, А. Мандольца, пер. с англ., М., 1988.

Б. П. Мурун.

**НЕЙТРОНОВОД** — канал, по к-рому распространяется направленный поток нейтронов. В простейшем случае Н. служит прямая вакуумированная труба, окружённая защитой для поглощения нейтронов, выходящих через боковые стенки Н. Надтепловые нейтроны (с энергией  $\rho > 0,1$  эВ) практически не взаимодействуют с веш. полями (магн., гравитационным) и поэтому распространяются по Н. прямолинейно по законам геом. оптики. Для формирования пучков внутри Н. устанавливаются коллиматоры из материалов, поглощающих нейтроны. Плотность потока нейтронов в таких Н. уменьшается как  $1/r^2$ , где  $r$  — расстояние от центра источника нейтронов. Обычно применяются Н. длиной 10—1000 м, диам. 5—50 см с входными и выходными окнами из Al, толщиной 1—2 мм, откаченные до давления 1—2 Па. Н. используются для вывода сформир. пучков нейтронов из источника (реактор, ускоритель), а также в сочетании с импульсными нейтронными источниками в *нейтронной спектроскопии* по времени пролёта.

Для нейтронов с энергией  $\rho < 0,1$  эВ используются зеркальные Н., основанные на полном отражении нейтронов от стенок Н. Угругое керосептное рассеяние нейтронов на атомных ядрах в стенках Н. эквивалентно действию на нейтроны небольшого отталкивающего потенциала  $U \leq 2 - 3 \cdot 10^{-7}$  эВ (для Ni, Fe, графита). Поэтому нейтроны с энергией  $\rho$ , падающие на гладкие (зеркальные) стенки Н. под углами  $\alpha < (U/\rho)^{1/2}$ ,



полностью отражаются обратно внутрь Н. (см. Нейтронная оптика). Начиная с  $r = d(\partial U/\partial \epsilon)^{1/2}$  ( $d$  — поперечные размеры), полное отражение от стенок должно испытывать все нейтроны с энергией  $\epsilon < \epsilon_0$ , и плотность потока таких нейтронов в Н. будет оставаться почти постоянной. Нек-рые потери нейтронов возникают за счёт диффузного отражения от шероховатостей стенок и слабого поглощения в тонком поверхностном слое (толщиной  $\sim 200$  А), соответствующем глубине проникновения нейтрона в стенку при полном отражении. Для тепловых нейтронов с  $\epsilon = 0,025$  эВ и стенок из Ni ( $U = 2,40 \cdot 10^7$  эВ) макс. угол скольжения  $\alpha = 10^\circ$ . Обычно зеркальные Н. изготавливают из полипропиленовых пластин с напыленным на поверхность тонким (1—2 мкм) слоем Ni. Пластинки склеиваются в Н. коробчатого сечения.

Если зеркальный Н. плавно изогнуть с радиусом изгиба  $R = 2d^2 \epsilon_0 / U d^2$  — размер Н. в плоскости изгиба, то он может служить фильтром, пропускающим нейтроны с  $\epsilon < \epsilon_0$ . Кроме того, пучок на выходе изогнутого зеркального Н. свободен от  $\gamma$ -излучения, неизбежно исключаемого нейтронами источниками. Зеркальные Н. используются также и как поляризаторы медленных нейтронов. С этой целью отражающий слой изготавливается из ферромагнетика, для к-рого отталкивающей нейтроны потенциал стенок равен  $U' = U \pm \mu B$ , где  $\mu$  — магн. момент нейтрона,  $B$  — индукция магн. поля в ферромагн. слое, знаки  $\pm$  соответствуют двум ориентациям спина нейтрона. В нек-рых материалах (напр., сплав 50% Fe + 50% Co)  $U = |\mu B|$  и полное отражение имеет место только для одной из возможных проекций спина нейтрона (см. Поляризованные нейтроны). Ультразвонковые нейтроны ( $\epsilon < U$ ) испытывают полное отражение от стенок Н. при любых углах падения и распространяются по Н. произвольной формы как сильно разреженный газ.

Лит. см. при ст. Нейтронная оптика. В. И. Луцков, **НЕЙТРОНОГРАФИЯ** — совокупность методов исследования структуры и свойств вещества с помощью рассеяния нейтронов низких энергий ( $\epsilon \leq 1$  эВ). Длина волны де Бройля медленных нейтронов соизмерима с межатомами расстояниями в конденсир. средах, что позволяет изучать взаимное расположение атомов (см. Нейтронная дифракция). Масса и кинетич. энергия нейтрона соизмеримы с массой атома и энергией межатомих взаимодействий в веществе, что позволяет с помощью *нейтронного рассеяния* нейтрона исследовать динамик. свойства отд. атомов и молекул в среде. Магн. момент нейтрона взаимодействует с магн. моментами атомов, что позволяет по интенсивности и поляризации магн. рассеяния определять величины магн. моментов атомов, их взаимное расположение и ориентацию, динамик. свойства (см. Магнитная нейтронная оптика). Н. применяется для исследования структурных, динамич. и магн. свойств практически всех известных форм конденсир. состояний вещества, от простых жидкостей и кристаллов до биологических макромолекул.

Рассеяние нейтронов веществом принято классифицировать по след. признакам: по изменению энергии нейтрона при рассеянии (упругое, неупругое); по характеру взаимодействия, ответственного за рассеяние (ядерное, магнитное); по степени когерентности нейтронных волн, рассеянных от множества центров, образующих изучаемое вещество. В общем случае интенсивность нейтронной волны, рассеянной малым объёмом вещества, можно представить в виде двух слагаемых, первое из к-рых пропорц. числу рассеивающих центров  $N$  (некогерентная составляющая), второе —  $N^2$  (когерентная составляющая). Когерентная составляющая проявляется в виде пиков на нейтронграмме, некогерентная определяет фон. Некогерентная составляющая нечувствительна к структуре вещества, отражает взаимодействие нейтрона с отд. рассеивающими центрами (дефектами, примесями) и даёт информацию

только о динамик. свойствах отд. рассеивателей (атомных ядер, магн. моментов, молекул). Когерентная составляющая является структурно-чувствительной и позволяет получать информацию о структуре вещества, коллективных динамик. свойствах.

Отличия Н. от методов, использующих рассеяние др. частиц (мелитроннография, рентгеновского структурного анализа, рассеяния света), связаны со свойствами нейтрона: отсутствием элетрич. заряда, наличием массы покоя и взаимодействием с веществом только посредством ядерных и магн. сил, а также с высокой проникающей способностью нейтрона, возможностью обмениваться со средой значит. частью кинетич. энергии, изотропией амплитуды ядерного рассеяния и его нерегулярной зависимостью от массового числа  $A$  и заряда  $Z$  ядра. Н. является единственным методом, пригодным для исследования нек-рых свойств конденсированных сред, и часто применяется в физике твёрдого тела, жидкостей, физической химии, молекулярной биологии и др.

Нейтроннографич. исследования проводятся в научных центрах, располагающих мощными нейтронными источниками — исследовательскими ядерными реакторами или ускорителями частиц с мишенью, производящей нейтроны. В СССР такими центрами являются ИАЭ, ОИЯИ (Дубна), ЛИЯФ (Гатчина) и др. Осн. зарубежные центры — Ин-т Лауз — Жанкевна (Гренобль, Франция), Брукхейвенская нац. лаборатория (Нью-Йорк, США), лаборатория Резерфорд — Аллтон (Великобритания) и др.

Лит. см. при ст. Нейтроннография, структурная. А. М. Балагуров, Ю. М. Остаев, **НЕЙТРОНОГРАФИЯ СТРУКТУРНАЯ** — исследование атомной структуры конденсир. сред методом дифракции нейтронов низких энергий на атомных ядрах (упругого когерентного рассеяния). В Н. с. используются нейтроны с длиной волны де Бройля  $\lambda \geq 0,3$  А.

Рассеяние нейтронной волны на одиночном ядре описывается с помощью т. н. амплитуды рассеяния  $b$ , имеющей смысл амплитуды сферич. волны, испускаемой ядром, если на него падает плоская возбуджающая волна единичной амплитуды. Амплитуда рассеяния зависит от массового числа ядра  $A$ , его заряда  $Z$ , а также от относит. ориентации спинов нейтрона и ядра. Поэтому сумма сферич. волн, рассеянных ансамблем нежидкост. ядер, состоит из слагаемых с разл. амплитудами. В Н. с. важна усреднённая амплитуда ( $\bar{b}$ ), наз. когерентной амплитудой рассеяния. Средние амплитуд проводяются по спиновым состояниям, изотопному и химическому составу ансамбля ядер, эквивалентных в структурном отношении. Среднеквадратичная флуктуация ( $b^2$  —  $\bar{b}^2$ ) определяет интенсивность некогерентного рассеяния. Интенсивность когерентного рассеяния — *дифракции нейтронов* зависит от атомной структуры вещества, тогда как интенсивность некогерентного рассеяния к структуре нечувствительна.

Для наблюдения дифракции нейтронов на исследуем. объект (образец) объёмом  $V$  направляют коллимированный пучок нейтронов с волновым вектором  $k_0$  и регистрируют интенсивность  $I$  рассеянных нейтронов, имеющих волновой вектор  $k$  той же длины, но др. ориентации ( $k = k_0 = 2\pi/\lambda$ ). Интенсивность является ф-цией т. н. вектора рассеяния  $\kappa = k - k_0$ ,  $\kappa = 4\pi \sin \theta / \lambda$ , где  $2\theta$  — угол рассеяния:

$$I(\kappa) = |A|^2 = \left| \int_V \rho(r) \exp(i\kappa r) dV \right|^2. \quad (1)$$

Здесь  $A$  — амплитуда рассеянной нейтронной волны,  $r$  — пространств. координата точки. Соотношение (1) показывает, что рассеянная нейтронная волна — сумма волн, рассеянных элементарными объёмами  $dV$ , каждая из к-рых имеет амплитуду  $\rho(r)dV$  и фазовый множитель  $\exp(i\kappa r)$ ;  $\rho(r)$  наз. плотностью когерентной амплитуды рассеяния нейтронов. Задачей Н. с. инвизи-

ется привлечение к наблюдаемой зависимости  $I(\mathbf{k})$  сведений о ф-ции  $\rho(r)$ , описывающей исследуемую структуру.

**Кристаллы.** Кристаллы обладают периодич. атомной структурой. Положение атома в кристалле может быть задано вектором  $r_{Nj} = r_j + r_N$ , где  $r_j$  указывает на положение  $j$ -го атома в  $N$ -й элементарной ячейке, а  $r_N$  — задает положение  $N$ -й ячейки в кристалле. Плотность амплитуды рассеяния:

$$\rho(r) = \sum_{Nj} b_{jN} \delta(r - r_{Nj}),$$

где  $b_{jN}$  характеризует вероятность рассеяния нейтрона каждым ядром, а  $\delta$ -функция указывает положение ядра. Суммирование ведётся по всем атомам кристалла. Величины  $b$  определяются на кристаллах с известной структурой или методами нейтронной оптики. Значение  $b$  установлено для 150 (из 276) стабильных нуклидов, в т. ч. практически для всех нуклидов первой половины периодич. системы элементов.

Интенсивность пучка рассеянных нейтронов пропорц. дифференц. сечению рассеяния,  $k$ -рое для одной элементарной ячейки кристалла имеет вид:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left| \sum_j b_j \exp(i\mathbf{m}r_j) \right|^2 \frac{(2\pi)^3}{V_c} \delta(\mathbf{k} - 2\pi\mathbf{H}). \quad (2)$$

Здесь  $V_c$  — объём элементарной ячейки,  $\mathbf{H}$  — вектор обратной решётки, задаваемой с помощью индексов кристаллографических  $(h, k, l)$ . Дельта — ф-ция в (2) показывает, что рассеяние нейтронов будет наблюдаться в виде узких дифракц. максимумов интенсивности (рефлексов) при  $\mathbf{k} = 2\pi\mathbf{H}$ , т. е. при выполнении *Брэгга — Вульфа условия*. Множество векторов  $\mathbf{H}(h, k, l)$  задано трансляц. симметрией кристалла, поэтому по совокупности векторов  $\mathbf{H}$ , для  $k$ -рых наблюдаются дифракц. максимумы, можно определить размеры и симметрию элементарной ячейки.

Комплексная величина  $F(\mathbf{k}) = \sum_j b_j \exp(i\mathbf{m}r_j)$  наз. структурной амплитудой. Т. к.  $\mathbf{k} = 2\pi\mathbf{H}$ , то  $F(\mathbf{k}) = F(h, k, l) = F(\mathbf{H})$ . Квадрат модуля  $|F(\mathbf{k})|^2$  определяет интенсивность дифракц. максимума,  $k$ -рая, т. о., зависит от совокупности  $\{b_j, r_j\}$ , полностью описывающих структуру элементарной ячейки. Восстановление сорта ядр ( $b_j$ ) и их расположения в элементарной ячейке ( $r_j$ ) производится по совокупности измеренных значений  $F(\mathbf{H})$  с помощью обратного преобразования Фурье (фурье-синтеза, или «сёртки»):

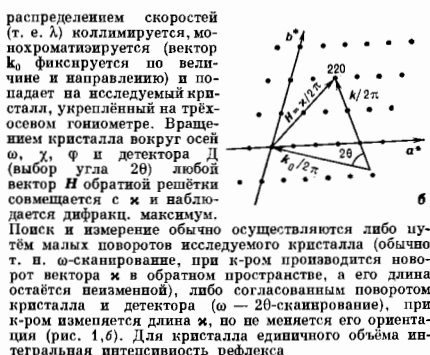
$$\rho(r) = \frac{1}{V_c} \sum_{\mathbf{H}} F(\mathbf{H}) \exp(-2\pi i\mathbf{H}r).$$

Эта схема решения структурной задачи является усложнённой. Тепловые колебания ослабляют интенсивность пиков. Учёт тепловых колебаний атомов в кристалле приводит к умножению каждого слагаемого в (2) на  $\exp(-W_j)$ , где  $W_j = \kappa^2 \langle u_j^2 \rangle$  — *Дебая — Уоллера фактор*,  $\langle u_j^2 \rangle$  — среднеквадратичная проекция амплитуды тепловых колебаний ядра на направление  $\mathbf{k}$ . Ослабление прямого и дифрагированного пучков происходит в реальном кристалле также из-за поглощения и рассеяния нейтронов (э к с т и н ц и я). Др. трудность связана с тем, что измеряемая интенсивность дифракц. максимумов пропорц. квадрату модуля структурной амплитуды  $|F(\mathbf{H})|^2$  и информация о её фазе оказывается утраченной; для  $\rho(r)$  при этом нет однозначного решения.

Для определения фазы  $F(\mathbf{H})$  используются ядра, обладающие низколежащими нейтронными резонансами (см. *Нейтронная спектроскопия*), вблизи  $k$ -рых  $b$  становится комплексной величиной и сильно зависит от  $l$  ( $^{132}\text{Cd}$ ,  $^{148}\text{Sm}$ ,  $^{163}\text{Gd}$  и  $^{157}\text{Cd}$ ). Если структура содержит один из этих нуклидов, его положение опреде-

ляется методом Паттерсона (см. *Рентгеновский структурный анализ*), а затем из анализа интенсивностей рефлексов, измеренных при неск.  $l$ , вычисляются фазы  $F(\mathbf{H})$ . При этом достигается различие интенсивностей для рефлексов соответствующих  $\mathbf{H}$  и  $-\mathbf{H}$  порядка 10%. Др. способ определения фаз структурных амплитуд состоит в замещении одного из компонентов структуры его изотопом (см. ниже).

**Экспериментальные методы.** Измерение интенсивностей и положений большого числа ( $10^2 - 10^3$ ) дифракц. максимумов осуществляется с помощью нейтронных дифрактометров. Их разнообразие связано с разными типами нейтронных источников, способами монохроматизации нейтронов и их регистрации. На ядерных реакторах непрерывного действия в основном применяется т. п. в у о с н и й д и ф р а к т о м е т р (рис. 1, а). Поток нейтронов с максвелловским



$$I(h, k, l) = \Phi_0 \frac{\lambda^3}{\sin 2\theta} \frac{|F(h, k, l)|^2}{V_c} A(\lambda, \theta) Y(\lambda, \theta),$$

где  $\Phi_0$  — поток монохроматизир. нейтронов на образце,  $A$  и  $Y$  — множители, учитывающие поглощение и экстинкцию.

В случае импульсных источников нейтронов (рис. 2, а) на кристалл попадает вомонохроматич. поток нейтронов (вектор  $k_0$  фиксируется только по направлению) и рассеяние наблюдается при постоянном угле  $2\theta$ . Вращением кристалла совмещаются только направления векторов  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{k}$ . Детектор регистрирует (разделенные по времени пролёты нейтронов от источника до детектора) дифракц. максимумы отражений от кристаллографич. плоскости всех порядков. Интенсивность  $I$  измеряется как ф-ция времени пролёта или, что эквивалентно, как ф-ция  $l$  нейтронов. При фиксир. положениях кристалла и детектора направление  $\mathbf{k}$  в обратном пространстве сохраняется (рис. 2, б), а его длина пробегает

интервал  $\Delta\lambda = 4\pi \sin\theta(1/\lambda_{\text{макс}} \pm 1/\lambda_{\text{мин}})$ . При этом интегральная интенсивность рефлекса:

$$I(h, k, l) = \Phi(\lambda) \frac{\lambda^4}{2\sin^2\theta} \frac{|F(h, k, l)|^2}{V_c} A(\lambda, \theta) Y(\lambda, \theta),$$

где  $\Phi(\lambda)$  — спектральная плотность потока нейтронов, падающих на образец ЭВМ управляет положениями

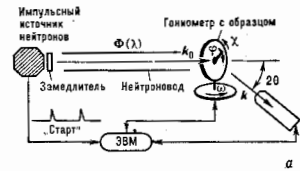
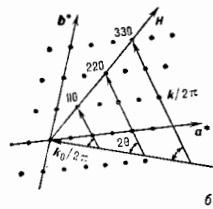


Рис. 2. а — схема дифрактометра по времени пролёта на импульсном источнике нейтронов; б — построение Эвальда.



образца и детектора и организует накопление и обработку эксперим. данных).

Разрешающая способность нейтронных дифрактометров  $\Delta N/N \sim 10^{-2}$ ; в дифрактометрах высокого разрешения  $\Delta N/N \sim 5 \times 10^{-4}$ . При этом параметры элементарной ячейки кристалла определяются с относит. точностью  $\sim 5 \times 10^{-3}$  и достигается практи-

чески полное разделение упругого и неупругого компонентов в рассеянном нейтронном пучке (см. *Неупругое рассеяние нейтронов*).

На рис. 3 приведено распределение  $\rho(r)$  в кристалле  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  вблизи водородной связи  $\text{O} - \text{H} - \text{O}$ . Смеще-

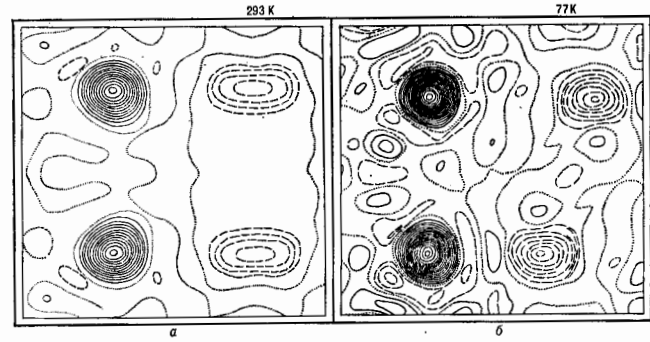


Рис. 3. Фрагмент проекции плотности амплитуды рассеяния  $\rho(r)$  на плоскость (001) в кристалле  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  при  $T = 293 \text{ K}$  (а) и  $T = 77 \text{ K}$  (б). Показаны 2 атома О ( $\rho > 0$ , непрерывные линии) и два атома Н ( $\rho < 0$ , разрывные линии); точки соответствуют  $\rho = 0$ .

ние Н ( $b = -0,374 \cdot 10^{-12} \text{ см}$ ) к одному из атомов О при  $T = 77 \text{ K}$  связано с фазовым переходом  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  в сегнетоэлектрич. состоянии.

Аморфные твёрдые и жидкости не обладают дальним порядком в расположении атомов, но обладают ближним порядком — некой упорядоченностью на расстояниях, сравнимых с размерами атомов (см. *Дальний*

и ближний порядок). Для описания ближнего порядка используется коррелин. Ф-ция  $g(r)$ , имеющая смысл вероятности обнаружить к.-л. ядро в точке  $r$  (в объёме  $dV$ ), если др. ядро находится в начале координат. Дифференц. сечение когерентного рассеяния (в случае атомов одного сорта) имеет вид

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = b^2 \left[ 1 + \int_V g(r) \exp(i\mathbf{x}r) dV \right]$$

или после усреднения по ориентациям (для изотропного вещества)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = b^2 \left[ 1 + 4\pi \int_0^\infty g(r) \frac{\sin(\mathbf{x}r)}{\mathbf{x}r} r^2 dr \right]. \quad (3)$$

Ф-ция  $g(r)$  может быть найдена из (3) с помощью обратного преобразования Фурье.

Если вещество содержит атомы неск. видов ( $\alpha$  и  $\beta$ ), то  $g(r)$  можно представить в виде суперпозиции парциальных коррелин. Ф-ций  $g_{\alpha\beta}(r)$ , описывающих распределение расстояний между атомами сортов  $\alpha$  и  $\beta$ . Парциальные ф-ции  $g_{\alpha\beta}$  в сечении рассеяния входят в качестве слагаемых с коэф., пропорциональными произведению соответствующих когерентных амплитуд рассеяния  $b_\alpha$  и  $b_\beta$ . Это позволяет использовать для нахождения  $g_{\alpha\beta}$  т. н. изотопное замещение. Напр., при исследовании структуры воды выделяют 3 вида расстояний:  $\text{H} - \text{H}$ ,  $\text{O} - \text{O}$  и  $\text{H} - \text{O}$ , к-рые удаётся определить, изучая рассеяние нейтронов в смесях  $\text{H}_2\text{O} - \text{D}_2\text{O}$ . Таким способом были исследованы структуры ряда электролитов (напр., растворы  $\text{NiCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$  в воде), аморфных металлов и др. аморфных веществ. Замещение Н на D оказалось эффективным при исследовании структуры жидких кристаллов и фазовых превращений в них.

Разбавленные растворы макромолекул и молекулярные газы. Выражение (1) для интенсивности в этом случае остаётся в силе, однако интегрирование можно ограничить объёмом одной молекулы или макромолекулы, т. е. пренебречь межмолекулярным взаимодействием. Когерентное рассеяние в основном происходит при углах  $\theta < \lambda/R$ , где  $R$  — характерный размер частицы, и быстро затухает с увеличением  $\theta$ . В случае макромолекул обычно  $R \gg \lambda$  и рассеяние сосредоточено в области малых  $\theta$  (см. *Малоугловое рассеяние*). Из зависимости  $I(x)$  можно извлечь информацию о разме-

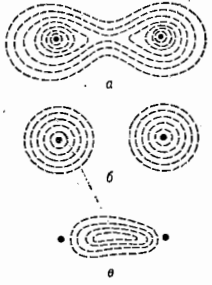


Рис. 4. а — электронная плотность, определенная методом РСА; б — вычисленная по нейтронным данным для сферически-симметричного атомного фактора; в — радиальная плотность.

Рис. 5. Часть нейтронно-поликристалла  $Al_2O_3$ .

рах и в некоторых случаях о форме молекул. Если в отдельных частях макромолекулы произвести изотопное замещение (обычно Н на D), то можно определить взаимное расположение и форму этих частей. При повышенных концентрациях макромолекул в растворах межмолекулярное взаимодействие становится существенным, что позволяет исследовать структуру самих растворов.

**Применения.** Н. с. часто применяется

после рентгеновского структурного анализа (РСА), что позволяет опустить начальные этапы анализа (напр., определение симметрии кристалла) и приступить сразу к уточнению структуры. Пространств. разрешение, достигаемое при фурье-синтезе, в Н. с. может быть выше, чем в РСА. Это связано с разл. природой *атомного фактора*,  $k$ -ый для нейтронов определяется тепловым движением ядра, а для рентг. лучей — как тепловым движением, так и размерами электронной оболочки атома.

Совместное использование Н. с. и РСА позволяет найти распределение электронной плотности в атоме. Фурье-синтез электронной плотности в элементарной ячейке методом РСА восстанавливает распределение плотности электронов, размытое тепловым движением атома. Н. с. позволяет рассчитать электронную плотность сферически симметричной части атома, «размытую» тепловым движением. Разностный Фурье-синтез содержит информацию о несферич. части электронной оболочки атома, участвующей в хим. связях (рис. 4), что даёт возможность определить характер связи (одинарная, кратная,  $\sigma$ - или  $\pi$ -связь), заряд иона или ионной группы и др.

Применения Н. с. связаны с решением задач, недоступных для РСА. К их числу относятся: исследования структуры водородосодержащих соединений с целью определения координат атомов водорода и изучения структуры водородных связей; исследования соединений, одновременно содержащих лёгкие и тяжёлые элементы, соединений из элементов с близкими  $Z$ , в частности упорядочивающихся сплавов (FeCo, CuZn и др.).

Дефекты кристаллич. структуры (примеси, вакансии, флуктуации состава, статистич. разупорядоченность и др.) приводят к ослаблению и уширению осн. рефлексов и появлению диффузного рассеяния. Анализ спектра рассеянных нейтронов позволяет отделить рассеяние на статич. дефектах от рассеяния на колебаниях кристаллич. решётки.

Др. возможность Н. с. связана с применением нейтронов с  $\lambda > 2d_{\max}$ , где  $d_{\max}$  — макс. межплоскостное расстояние в кристалле. При этом дифракция на кристаллич. решётке полностью отсутствует и можно наблюдать рассеяние на достаточно крупных неупорядоченных (зародыши новых фаз, поля деформации, микротрещины и др.) размерами до неск. сотен А.

Для исследования поликристаллов применяются дифрактометры, обладающие высоким разрешением и широким диапазоном по  $\lambda$ . В одной порошковой нейтроннограмме удаётся наблюдать неск. сотен рефлексов (рис. 5), что позволяет анализировать структуры с  $V_c \leq 2 \cdot 10^3$  А<sup>3</sup>.

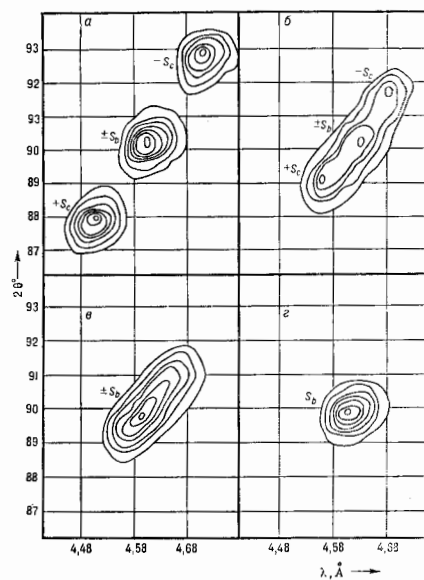
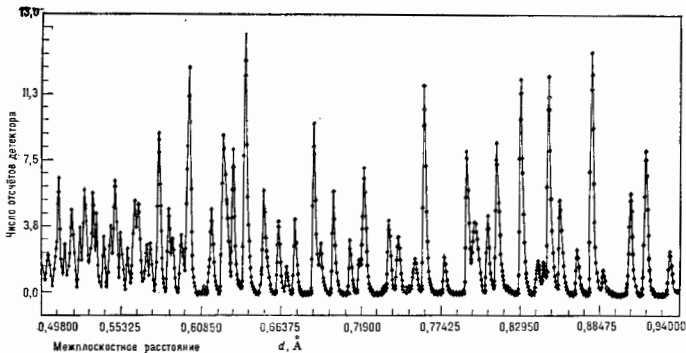


Рис. 6. Двумерные распределения интенсивности  $I$  в узле (002) кристалла — сегнетоэластина  $KDp$  ( $SeO_3$ ) при  $T = 52^\circ C$  (a);  $-1^\circ C$  (б);  $+4^\circ C$  (в);  $100^\circ C$  (г);  $S_b$  и  $S_c$  — компоненты узла, отнесенные к поперечным плоскостям возможных конфигураций; знаки  $\pm$  указывают на противоположную направленность спонтанной сдвиговой деформации, возникающей ниже точки фазового перехода 2-го рода.

Высокая проникающая способность нейтронов даёт возможность изучать толстые (до неск. см) изделия одновременно на большой площади (неск. дм<sup>2</sup>). Высокая разрешающая способность дифрактометров позволяет анализировать текстуру материалов с симметрией ниже кубической.

Исследования доменной структуры (сегнетоэластиков, магнетиков), возникающей при переходе кристалла в менее симметричную фазу, основано на регистрации распределения  $I(x)$  в окрестности узлов обратной решетки. Измерение геом. характеристик этого распределения позволяет сделать заключение о точечной симметрии парамагн. и ферромагн. фаз кристалла, определить зависимость параметра порядка от температуры или внешних полей, выяснить тип фазового перехода (рис. 6).

Сохранение водорода в биол. системах достигает 50% от общего кол-ва атомов, что даёт возможность для H-замещения. В Н. с. биол. объектов, обладающих ограниченными дальним порядком (мультиламеллярные мембраны, фибриллярные системы и др.), удаётся наблюдать лишь первые вех. порядков, отражений, пространств. разрешение при этом  $\sim 10$  Å; анализ структуры ведётся в терминах пространств. распределения белков, липидов, воды.

Лит.: Абов Ю. Г., Литвин Д. Ф., Экспериментальные методы нейтрографии, «ПТЭ», 1960, т. 3, с. 3; Гуревич И. И., Тарасов Л. В., Финна нейтроны низких энергий, М., 1965; Вассал С. Е., Neutron diffraction, 3 ed., Oxf., 1975; Wright S. C., Ledbetter A. J., Diffraction studies of glass structure, «Phys. and Chem. Glasses», 1978, в. 17, p. 122; Neutron diffraction, ed. by H. Daehs, B., 1978; Ноэкин Э. П., Озеров Р. П., Хенинг К., Структурная нейтрография, М., 1979; Педербу Дж. Е., Neilsen G. W., The structure of electrolyte solutions, «Repts Progr. Phys.», 1981, в. 44, p. 593; Остаевич Ю. М., Сердюк И. П., Нейтрографические исследования структуры биологических макромолекул, «УФН», 1982, т. 137, с. 85; Кривораз М. А., Диффузное рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов, К., 1984; Уиндлер К., Рассеяние нейтронов от импульсных источников, пер. с англ., М., 1985.

**НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА** — область акустики, в к-рой изучают явления в звуковых полях большой интенсивности и взаимодействия звуковых волн с возмущениями другой природы (гидродинамич., тепловыми, эл.-магн. и т. д.). Для описания этих явлений недостаточно приближений линейной теории звука и необходим учёт нелинейных членов ур-ний гидродинамич. и ур-ний состояния. Такие явления (т. н. нелинейные эффекты) возникают в результате изменения физ. свойств среды, вызванных распространяющейся волной большой интенсивности и влияющих как на условия распространения данной волны (самовоздействие), так и на др. виды возмущений (взаимодействие).

Развитие Н. а. стимулировалось применением нелинейных звуковых полей и связанных с ними нелинейных эффектов. Так, необходимость увеличения интенсивности акустич. волн, используемых в УЗ-технологии, потребовала изучения условий фокусировки мощного звука и усреднённых эффектов в звуковых полях; совершенствование техн. средств, применяемых для зондирования океана и атмосферы, привело к разработке параметрч. приёмных и излучающих систем. Увеличение мощности промышленных шумов, в особенности урвня авиац. шумов, потребовало разработки теории генерации звука турбулентностью и изучения особенностей распространения шума большой интенсивности.

Н. а. занимает промежуточное место между линейной теорией звука и теорией ударных волн. Предметом её исследований являются слабо нелинейные волны, в то время как ударные волны, как правило, сильно нелинейны; в классич. же акустике нелинейные эффекты не рассматриваются вообще. Н. а. близка к нелинейной оптике и др. разделам физики нелинейных волн. К осн. вопросам, к-рыми занимается совр. Н. а., относятся: распространение волн конечной амплитуды, звуковые лучи большой интенсивности и их самовоздействие, явление поглощения и взаимодействие волн, особенности нелинейного взаимодействия в твёрдых телах, генерация и распространение интенсивных шумов, усреднённые эффекты в звуковом поле, акустич. кавитация и др.

**Распространение волн конечной амплитуды.** Распространение звуковой волны большой интенсивности (т. н. волны конечной амплитуды), в отличие от малоамплитудной, сопровождается нарастающим искажением её формы, обусловленным разницей в скоростях перемещения разл. точек профиля волны. Скорость с перемещения точки профиля, соответствующей заданному значению колебат. скорости  $v$ , определяется ф-лой

$$c(v) = c_0 + \epsilon v,$$

где  $v = (dc/d\rho) \rho_0 / c_0^2 + 1$  — нелинейный параметр среды,  $\rho_0$  и  $c_0$  — равновесные значения плотности среды и скорости звука в ней,  $S$  — энтропия. Точки профиля волны, соответствующие областям сжатия (где  $v > 0$ ), «бегут» быстрее точек, соответствующих областям разрежения (где  $v < 0$ ), т. к. скорость звука в области сжатия больше, чем в области разрежения. Кроме того, происходит увлечение волны средней, к-рая в области сжатия движется в направлении распространения волны, а в области разрежения — в противоположную сторону. Разница скоростей для разл. точек профиля поперечного мала в случае волн малой интенсивности, и волна успевает затухнуть, прежде чем в ней разовьются нелинейные эффекты. Поэтому распространение таких волн происходит практически без изменения формы, в соответствии с соотношениями линейной акустики, согласно к-рой скорость звука для всех точек профиля волны постоянна. Если же интенсивность волны достаточно велика, то влияние нелинейных эффектов оказывается более сильным, чем влияние диссипативных процессов, обуславливающих затухание волны, и картина волновых фронтов по мере распространения возрастает.

Для матем. описания явлений в звуковых полях большой интенсивности необходим учёт нелинейных членов ур-ний механики сплошной среды. В частности, следует урнать во внимание, что при больших возмущениях избыточное давление  $p'$  уже не пропорц. избыточной плотности  $\rho'$  (нелинейность Гукса закона для случая твёрдых тел), а выражается соотношением

$$p' = c_0^2 \rho' + \frac{1}{2} \left( \frac{dc}{d\rho} \right)_1 \rho'^2.$$

Кроме того, следует учесть нелинейные члены ур-ний движения сплошной среды. В результате получаются нелинейные ур-ния, к-рые для простейшего случая распространения плоской волны могут быть сведены к одному ур-нию (ур-нию Бюргера):

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\epsilon}{c_0^3} v \frac{\partial v}{\partial y} = b \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}, \quad (1)$$

где  $x$  — координата, вдоль к-рой распространяется волна,  $y = t - x/c_0$ ,  $t$  — время,  $b = v_{эф}^2 / 2c_0^3$  — диссипативный параметр среды. Здесь  $v_{эф} = \rho_0^{-1} [\eta + \zeta + \kappa (c_0^{-1} - c_p^{-1})]$  — эффективная вязкость,  $\eta$  и  $\zeta$  — коэф. сдвиговой и объёмной вязкостей,  $\kappa$  — коэф. теплопроводности,  $c_p$  и  $c_p$  — уд. теплоёмкости при постоянном объёме и давлении.

Вклад нелинейных эффектов зависит от амплитуды волны и характеризуется акустич. Маха числом:  $Ma = v_m / c_0 = \rho_m v_m / \rho_0$  (где  $v_m$  — амплитуда колебат. скорости частиц,  $\rho_m$  — вызванная звуковым возмущением амплитуда избыточной плотности), имеющих порядок отношения нелинейного члена к линейному в ур-нии (1). Относит. роль нелинейных и диссипативных эффектов характеризуется акустич. Рейнольдса числом  $Re_a = v_m \rho_0 / \lambda \nu_{эф}$  (где  $v_m$  — нач. значение амплитуды колебат. скорости,  $\lambda = c_0 / f$  — длина звуковой волны,  $f = \omega / 2\pi$  — ел. частота) определяет отношение нелинейного члена к диссипативному в ур-нии (1). Для воды

$Re_a = 3\rho_m/f$ , где  $\rho_m$  — амплитуда звукового давления в МПа,  $f$  — в МГц, поэтому для наблюдения величайшего эффекта на УЗ-частотах  $\sim 1$  МГц должно быть  $\rho_m \geq 1$  МПа. При  $Re_a \gg 1$  искажения формы волны становятся столь сильными, что образуется пилообразная волна (рис. 1). Профиль одного периода волны описывается точным решением ур-ния (1)

$$\frac{v}{v_{\text{эф}}} = (1 + \varepsilon M_a kx)^{-1} (-\omega y + \pi \text{th} \omega y \tilde{R}_{e_a}), \quad (2)$$

$$-\pi \leq \omega y \leq \pi,$$

где  $\tilde{R}_{e_a} = \varepsilon v_m \lambda / \lambda v_{\text{эф}}$  — текущее значение акустич. числа Рейнольдса,  $v_m = v_{m0} (1 + \varepsilon M_a kx)$ ,  $k$  — волновое число,  $\omega$  — частота первоначальной гармонич. волны.

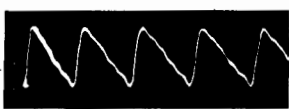
Пилообразную волну можно рассматривать как ударную волну, толщина сжатия к-рой, согласно (2), определяется ф-лой  $\delta/\lambda \approx (2Re_a)^{-1}$ . На начальной стадии образования пилообразной волны, когда  $\tilde{R}_{e_a} = Re_a \gg 1$ ,  $\delta/\lambda \ll 1$  и величину  $\delta$  можно представить в виде  $\delta = -v_{\text{эф}}/\varepsilon v_{m0}$ , что совпадает с выражением для толщины фронта слабой стационарной ударной волны со скачком скорости  $v_{m0}$ . Расстояние  $L$ , на к-ром происходит существенное изменение формы волны, зависит от амплитуды и длины звуковой волны. Для плоской волны оно определяется ф-лой  $kL = \varepsilon M_a$ . Так, в воде для волны интенсивностью в неск. десятков Вт/см<sup>2</sup>  $L$  — порядка сотен длин волн (рис. 2). В расходящихся (напр., сферич. или цилиндрич.) волнах эффект проявляется слабее,



Рис. 1. Профиль волны конечной амплитуды.

а в сходящихся сильнее, чем в плоских. В стоячих волнах конечной амплитуды также могут возникать ударные волны, причём их фронты движутся, периодически отражаясь от границ объёма, в к-ром возбуждена стоячая волна.

Рис. 2. Осциллограмма профиля волны конечной амплитуды на расстоянии 100 длин волн от излучателя. Амплитуда давления 1 МПа, частота 0,75 МГц.



Со спектр. точки зрения искажение формы волны означает нарастание в её спектре высших гармонич. составляющих осн. частоты. Их амплитуда вначале нарастает, достигает максимума в области набб. искажения волны при  $x \approx L$  и затем убывает вновь. В области, где  $\delta \approx \lambda$ , волна становится снова синусоидальной.

Нелинейное поглощение звука. Увеличение крутизны волновых фронтов приводит к увеличению крутизны скорости и темп-ры, что сопровождается сильной диссипацией энергии и является причиной нелинейного поглощения звука. Со спектр. точки зрения этот процесс можно рассматривать так же, как результат перекачки энергии в высшие, более сильно поглощаемые гармонич. составляющие волны. Поскольку волна при распространении меняется, коэф. её поглощения также зависит от расстояния: вблизи излучателя для первоначально синусоидальной волны поглощение невелико и описывается обычными выражениями линейной акустики (см. Поглощение звука); при удалении от излучателя коэф. поглощения возрастает, достигая максимума в области набб. искажений волны, после чего убывает. Поглощение в данной точке пространства зависит от амплитуды волны, возрастая с её увеличением.

Амплитудный коэф. поглощения первой гармонич. волны,  $\alpha_1'$ , в области пилообразной волны определяется ф-лой

$$\alpha_1' = \alpha_1 \sqrt{1 + Re_{a1}^2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_1 = v_{\text{эф}} \omega^2 / 2c_0^2$  — коэф. поглощения малоамплитудной волны (рис. 3). Напр., при распротраении в воде УЗ-волны с амплитудой звукового давления  $\rho_m = 0.3$  Па и частотой  $\omega = 10^7$  с<sup>-1</sup> в области образования пилообразной волны  $Re_a = 10^2$  и коэф. поглощения  $\alpha_1'$  возрастает на два порядка по сравнению с  $\alpha_1$ .

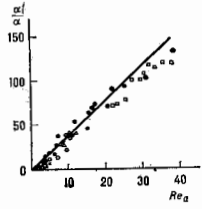


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента поглощения волны конечной амплитуды от акустического числа Рейнольдса. Сплошная линия — результат расчёта по формуле (3), значки — экспериментальные данные.

Поглощение волн большой интенсивности происходит не экзопоненц. закону. Уменьшение пикового значения колебат. скорости  $c_0$  плоской пилообразной волны описывается ф-лой

$$v_0 = \frac{v_{m0}}{1 + \varepsilon M_a(x - x_0)},$$

где  $v_{m0} = v_m(x_0)$ . Рост поглощения волны с увеличением её интенсивности приводит к явлению насыщения: при постепенном увеличении интенсивности излучения амплитуда звука в фиксир. точке поля растёт всё медленнее, асимптотически приближаясь к предельному значению, но зависящему от нач. амплитуды. Эффект линейного поглощения звука может заметно проявиться в мощных УЗ-фокусирующих системах, приводя к снижению коэф. усиления (см. Фокусировка звука).

Звуковые пучки большой интенсивности. В звуковых пучках высокой интенсивности изменение формы волны при распространении происходит не только вследствие различия в скоростях перемещения разл. точек профиля волны, но и в результате дифракц. эффектов. Если расстояние  $l$  от излучателя звука до области образования волны не выходит за пределы ближней зоны (см. Звуковое поле), т. е.  $l$  меньше длины т. н. проекторной зоны излучателя:  $l < ka^2/2$  (где  $a$  — радиус излучателя), то в области, где волна остаётся плоской, из синусоидальной волны успевают образоваться пилообразная волна, к-рая затем в результате сферич. расхождения в дальней зоне преобразуется в периодич. последовательность импульсов (рис. 4). Если же интенсивность волны недостаточно велика и пилообразная волна не успевает образоваться в проекторной зоне излучателя, то вначале развиваются дифракц. эффекты сферич. расхождения и лишь в дальней зоне, в расходящейся волне происходит увеличение крутизны профиля волны с расстоянием по логарифмич. закону.



Рис. 4. Схема эволюции профиля волны в интенсивном УЗ-пучке.

По мере распространения волны происходит перераспределение её интенсивности по сечению пучка, что чаще всего обусловлено нелинейным поглощением. Так, при распространении остронаправленного пучка с убывающей по радиусу пучка интенсивностью амплитудное распределение выравнивается по сечению след-

стве более сильного поглощения волны в области больших амплитуд. Изменение распределения интенсивности звука по сечению пучка может быть вызвано также процессами самофокусировки или самодефокусировки. При распространении звука в жидкости эти процессы обычно обусловлены локальным изменением скорости звука в результате нагревания среды, вызванного диссипацией акустич. энергии. Вблизи оси пучка интенсивность звука больше и соответственно среда сильнее разогревается. Если при этом скорость звука с ростом темп-ры падает, то происходит самофокусировка; напротив, если скорость звука растёт с увеличением темп-ры, пучок дефокусируется. Дефокусирующее влияние оказывают также *акустические течения*, развивающиеся в поле мощного пучка и приводящие к добавочному переносу звуковой волны вблизи оси пучка.

Разнообразны механизмы самовоздействия звука в жидкостях с пузырьками газа. Появление пузырьков приводит к снижению скорости звука. Если их распределение по сечению пучка неравномерно и концентрация пузырьков в присоединенной области более высока, то может быть связано, напр., с развитием кавитации, то скорость звука в центр. части пучка снижается и пучок фокусируется. Процесс самовоздействия звука может развиваться и при равномерном распределении пузырьков в жидкости, т. е. вследствие сильной нелинейности такой среды в ней наблюдается не только различие в скоростях перемещения разных точек профиля волны, но и скорость переноса волны как целого оказывается зависящей от амплитуды. Это приводит, в силу неравномерности распределения амплитуды звука по радиусу пучка, к самофокусировке (если скорость звука падает с ростом амплитуды) или к самодефокусировке (в обратном случае).

Ряд эффектов связан с транслюц. движением пузырьков. К их числу относится эффект нелинейного преломления пузырьковой среды, заключающийся в сильном уменьшении поглощения звука в пузырьковой среде по мере увеличения интенсивности акустич. волны. Это происходит вследствие того, что пульсирующие в звуковом поле пузырьки сближаются и сливаются, что приводит к уменьшению числа резонансных пузырьков, диссипирующих звуковую энергию, и поглощение среды уменьшается.

Нелинейное взаимодействие звуковых волн. При возбуждении в среде одновременно неск. волн большой интенсивности они не распространяются независимо, а порождают новые волны, т. е. *комбинационные тона*, частоты к-рых равны сумме и разности частот первичных волн. Наиб. выражены комбинац. тона, отвечающие резонансному взаимодействию волн, возникающему при выполнении условий синхронизма:

$$\begin{aligned} \mathbf{k} &= \mathbf{k}' \pm \mathbf{k}'', \\ \omega &= \omega' \pm \omega'', \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\omega$  и  $\mathbf{k}$  — частота и волновой вектор волны комбинац. тона,  $\omega'$ ,  $\omega''$  и  $\mathbf{k}'$ ,  $\mathbf{k}''$  — частоты и волновые векторы первичных волн. Амплитуда волны комбинац. тона  $A_k$  при резонансном взаимодействии описывается уравн.

$$\dot{A}_k = V_{kk'k''} A_k' A_k'',$$

где  $V_{kk'k''}$  — потенциал взаимодействия, определяемый характером нелинейности среды,  $A_k'$ ,  $A_k''$  — амплитуды исходных волн. В приближении заданного поля ( $A_k' = \text{const}$ ,  $A_k'' = \text{const}$ ) это уравн. приводит к линейно нарастающей со временем амплитуде  $A_k$ . Это значит, что по мере распространения волны происходит нарастание комбинац. тона до тех пор, пока влияние поглощения или ослабления первичных волн из-за перекачки энергии в комбинац. тона не замедлит этот процесс. Если условия синхронизма не выполняются и имеется расфазировка, интенсивность комбинац. тона

не нарастает, а меняется периодически по мере распространения волны.

Эффект генерации комбинац. тона в среде при взаимодействии звуковых пучков разл. частоты лежит в основе работы т. н. *параметрических излучателей* и *приёмников звука*, в к-рых область взаимодействия первичных волн (наз. волнами накачки) играет роль «бесточесной» антенны.

При распространении звука в жидкостях и газах влияние дисперсии чаще всего не существенно и все коллинеарно распространяющиеся волны оказываются в резонансе. Если же дисперсия скорости звука существенна, как, напр., в жидкостях с пузырьками газа или в нек-рых твёрдых телах, то для определения условий резонансного взаимодействия пользуются методом дисперсионных диаграмм. В простейшем случае коллинеарного взаимодействия волн для каждой из них строится дисперсионная характеристика  $\omega_i(k_i)$  (где  $i = 1, 2, 3$ ), к-рая представляет кривую (рис. 5) (или прямую — при отсутствии дисперсии). Наклон вектора, проведённого из начала координат  $O$  и точку, лежащую на дисперсионной характеристике, определяет фазовую скорость волны с данной частотой. Каждой из взаимодействующих волн ставится в соответствие

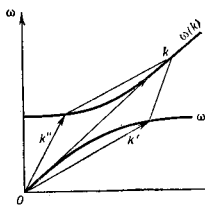


Рис. 5. Дисперсионная диаграмма трехволнового коллинеарного взаимодействия звуковых волн в жидкости с пузырьками газа. Кривые изображают две ветви дисперсионной зависимости  $\omega(k)$ .

вектор с компонентами  $(\omega_1, k_1)$ . При выполнении условий синхронизма (4) необходимо, чтобы вектор, соответствующий третьей компоненте взаимодействующих волн, представлял собой сумму векторов, отвечающих двум другим компонентам триплета, т. е. чтобы три вектора, вершины к-рых лежат на дисперсионной кривой, образовали треугольник.

Если точного сложения векторов не происходит, то считается, что условия синхронизма выполняются приближённо и в условиях (4) видится расстройка по волновому вектору  $\Delta k$  или по частоте  $\Delta\omega$ :

$$\begin{aligned} \omega_1 \pm \omega_2 &= \omega_3 + \Delta\omega, \\ k_1 \pm k_2 &= k_3 + \Delta k. \end{aligned}$$

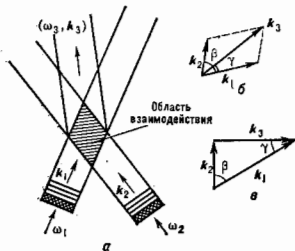
Наличие расстройки приводит к пространственным или временным бегущим результирующей волне. Если дисперсия отсутствует и все волны распространяются с одинаковой скоростью, то резонансные условия выполняются только для коллинеарного взаимодействия, что характерно для большинства жидкостей и газов. В изотропных твёрдых телах скорости продольных и сдвиговых волн различны, что открывает возможность выполнения условий синхронизма и для волн, распространяющихся под углом друг к другу (рис. 6).

Взаимодействие звука с «чезнующими» возмущениями среды — с температурными волнами, а в жидкостях с капиллярными волнами и в пузырьках газа — может приводить к явлению вынужденного рассеяния звука, подобного вынужденному *Мандельштама* — *Бриллюэна* рассеянию в оптике. Звук, рассеиваясь на возмущениях среды и взаимодействуя с ним, увеличивает амплитуду возмущения, что в свою очередь приводит к ещё более сильному рассеянию звука.

Если интенсивность одной из взаимодействующих волн во много раз больше интенсивности другой волны, то можно пренебречь обратным воздействием слабой волны на сильную и рассматривать воздействие интенсивной волны (волны накачки) как фактор, изменяющий

параметры среды, в к-рой распространяется слабая (сигнальная) волна. Перекачка энергии от сильной волны к слабой лежит в основе работы параметрич. усилителей и генераторов, применяемых в оптике. В акустике осн. трудность при создании параметрич. усилителей звука связана с тем, что из-за слабой дисперсии звуковых волн первичная волна накачки обычно быстро атакует в результате генерации ВЧ-гармоник, не успев передать энергию в сигнальную волну. Для преодоления этой трудности специально создаются нелинейные системы с дисперсией. Один из примеров такой системы — акустич. резонатор в виде полого кольца (тора), в одном из сечений к-рого помещён ВЧ-излучатель накачки. Наличие волноводной дисперсии позволяет осуществлять в такой системе параметрич. усиление и генерацию НЧ-звука. Другая возможность — использование дисперсии в самом веществе путём выбора специальных сред и соответствующих частот. Например, параметрическое усиление звука в поле высокочастотной УЗ-накачки наблюдалось в кристаллах окиси магния.

Рис. 6. Область взаимодействия при неколлинеарном взаимодействии волн (а) и образование волн суммарной (б) и разностной (в) частот.



Режимы параметрич. усиления могут осуществляться и при взаимодействии звука с др. видами возмущений среды. Так, в пьезополупроводнике, помещённом в электрич. поле, имеет место параметрич. усиление звука за счёт дрейфа электронов в приложенном электрич. поле и обратного пьезоэффекта.

Особенности нелинейного взаимодействия в твёрдых телах. В отличие от газов и жидкостей, в твёрдых телах вдоль произвольного направления могут распространяться (в общем случае) три упругие волны с разл. фазовыми скоростями и со взаимно ортогональными направлениями колебаний частиц среды (см. Кристаллоакустика). Это увеличивает число видов взаимодействия акустич. волн, разрешённых условиями фазового синхронизма (4). В твёрдом теле оказывается возможным, в частности, резонансное взаимодействие встречных волн, отсутствующее в жидкостях и газах. Напр., в изотропном твёрдом теле нелинейно распространяются встречные быстрая (FT) и медленная (ST) поперечные волны с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  образуют резонансный триплет с продольной волной (L) суммарной частоты (рис. 7) при след. соотношении частот:

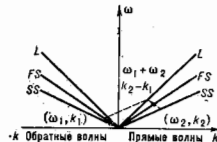
$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1 - c_L/c_{FT}}{1 + c_L/c_{ST}}$$

где  $c_L$ ,  $c_{FT}$ ,  $c_{ST}$  — скорости соответствующих волн. Резонансные триплеты могут образовывать также волны, распространяющиеся под углом друг к другу. Напр., резонансное возбуждение продольной волны суммарной частоты поперечными волнами, пересекающимися под углом  $\beta$ , происходит при выполнении условия

$$\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{c_L}\right)^2 = \left(\frac{\omega_1}{c_{FT}}\right)^2 + \left(\frac{\omega_2}{c_{ST}}\right)^2 + 2 \frac{\omega_1 \omega_2}{c_{FT} c_{ST}} \cos \beta.$$

В изотропном твёрдом теле пересекающиеся под углом волны могут образовывать пять видов резонансных триплетов, в анизотропных телах (кристаллах) их число возрастает до 21. В кристаллах, кроме того, появляется зависимость эффективности взаимодействия от ориен-

Рис. 7. Дисперсионная диаграмма встречного неколлинеарного взаимодействия бездисперсионных акустических волн: быстрой свдвиговой FT и медленной свдвиговой ST с образованием продольной волны L суммарной частоты.



тации волновых векторов взаимодействующих волн относительно кристаллографич. осей. При этом генерация комбинац. тонов для поперечных волн может происходить с поворотом плоскости поляризации волны.

Взаимодействие волн в твёрдых телах обусловлено обычно нелинейностью упругих возмущений, описываемых нелинейными уравнениями механики сплошной среды. Возможны также механизмы нелинейности, связанные с взаимодействием упругих деформаций с др. видами возмущений в твёрдом теле. В пьезоэлектрич. кристаллах может проявиться нелинейность пьезоэффекта; в пьезополупроводниках доминирующим механизмом часто оказывается электронная (концентрационная) нелинейность, обусловленная нелинейной зависимостью концентрации носителей заряда от деформации, вызванной акустич. волной. Соответственно, если при экспериментах исследованию нелинейных искажений УЗ-волн в большинстве твёрдых тел при частотах в неск. МГц и амплитудах деформации  $\sim 10^{-8}$  величина второй гармоники не превышает веск. % от амплитуды первой гармоники, то в пьезополупроводниковых кристаллах, благодаря вкладу акустоэлектрической нелинейности, она возрастает более чем на порядок.

В пьезоэлектрич. кристаллах акустич. волны могут взаимодействовать не только между собой, но и с эл.-магн. волнами, в частном случае — с однородными электрич. или магн. полем. Напр., встречное взаимодействие бегущих акустич. волн одинаковой поляризации в пьезоэлектрич. кристалле приводит к возбуждению однородного электрич. поля удвоенной частоты. Этот эффект используется в устройствах обработки сигналов в акустоэлектронике.

При излучении в пьезоэлектрич. образец одной акустич. волны и одноврем. возбуждения электрич. поля на удвоенной частоте наблюдается параметрич. генерация встречной акустич. волны — третьей компоненты рассматриваемого резонансного триплета, образованного двумя встречными акустич. волнами и электрич. полем. Описанные эффекты взаимодействия акустич. волн и переносимого электрич. поля лежат в основе электроакустического гза и являются одним из примеров обращения волнового фронта.

Нелинейные взаимодействия приводят к изменению параметров акустич. волн под влиянием постоянных или медленно меняющихся механич. или электрич. полей. При механич. деформировании кристаллов, напр., меняются фазовая и групповая скорости акустич. волн и их поляризация. В пьезоэлектрич. кристаллах фазовая скорость акустич. волн изменяется также при приложении постоянных электрич. полей. Указанные эффекты используются для измерения внутр. напряжений, определения модулей упругости третьего и более высоких порядков, управления акустич. волнами.

Исследование нелинейных взаимодействий УЗ-волн в твёрдых телах важно для определения характеристик фоно-фононных взаимодействий, лежащих в основе процессов установления теплового равновесия, теплопроводности, теплового расширения твёрдых тел.



Фонон-фононные взаимодействия играют определяющую роль в поглощении гиперзвуковых волн (см. *Гиперзвук*) в кристаллах, особенно при низких температурах, в эффектах нелинейного поглощения УЗ-волн.

Шумы большой интенсивности. Распространение шумов большой интенсивности отличается от поведения слабого шума. В процессе распространения спектр шума меняется: спектр, плотность его в области высоких частот растёт в результате генерации гармоник энергонесущих спектр. компонент, расширяется и НЧ-часть спектра из-за появления комбинац. новов при условии, что максимум спектр. плотности шума в нач. момент соответствовал частоте, отличной от нулевой. На расстояниях  $L \approx c_0^2 \epsilon h (\nu^2)^{1/2}$  (где  $h$  — длина волны энергонесущей компоненты,  $\nu^2$  — среднеквадратичная колебл. скорость) в шумовом сигнале возникают разрывы и затухание шума растёт. На этой стадии в ВЧ-области спектра спектр. плотность шума складает по универсальному закону  $\omega^{-4}$ , не зависящему от вида нач. спектра. Генерация интенсивных шумов часто также бывает связана с нелинейными взаимодействиями гидродинамик. возмущений. Напр., шумы самолётов и ракетных двигателей в значит. степени обусловлены генерацией шума, турбулентности в результате вихревых взаимодействий (см. *Аэроакустика*).

Усреднённые эффекты в звуковом поле. Кавитация. В звуковых полях большой интенсивности наряду с переменными возмущениями среды, меняющимися с частотой звука, могут возникать постоянные силы и скорости, пропорц. квадрату амплитуды звука. Они обуславливают т. н. усреднённые эффекты в звуковом поле, к числу к-рых относятся *давление звукового излучения, акустические течения, воздействие на помещённые в звуковом поле тела* (см. *Подверженные силы в звуковом поле*) и др.

В жидкости распространение интенсивных звуковых волн может вызывать акустич. кавитацию — появление в сплошной среде интенсивно пульсирующих полостей, сопровождающееся излучением мощных акустич. импульсов сжатия и возникновением микропотоков вблизи пузырьков. С физ. точки зрения кавитацию можно рассматривать как процесс кумуляции энергии, плотность к-рой в окрестности пузырька превышает среднюю плотность энергии акустич. поля в  $10^3$ — $10^4$  раз.

Применение нелинейных акустических эффектов. Первые применения нелинейных эффектов были связаны с разработкой методов измерения характеристик акустич. поля на основе регистрации усреднённых эффектов: измерение интенсивности звука по давлению звукового излучения с помощью радиометров или по вслушиванию свободной поверхности жидкости под действием звука, измерение колебл. скорости методом *Резка диска*. Для зондирования атмосферы, океана, для целей медицинской акустики применяют параметрические излучатели и приёмники благодаря их широкому охвату, острой направленности излучения и отсутствию боковых лепестков в диаграмме направленности.

Многие процессы УЗ-технологии базируются на использовании нелинейных эффектов. В установках УЗ-очистки поверхностей деталей кавитат. эрозия обуславливает удаление загрязнений, жёстко связанных с поверхностью (окалина, окислы и др.). Для удаления т. н. мягких загрязнений — жировых плёнок и др. — в основном используются микропотоки, возникающие вблизи пульсирующего пузырька. Воздействием на вещество в зоне кавитации пользуются для получения мелкодисперсных амальгам, ускорения хим. реакций, экстрагирования ферментов из животных и растительных клеток и др. В установках УЗ-коагуляции аэрозоль используются эффекты взаимодействия частиц в УЗ-поле.

Эффекты параметр. усиления УЗ в пьезополупроводниках и др. явления взаимодействия эл.-магн. и зву-

ковых волн используются в акустоэлектронике. Получили развитие методы нелинейной спектроскопии, они оказались, в частности, весьма эффективными в задаче регистрации пузырьков в жидкости и существенно расширили возможности УЗ-диагностики. При облучении пузырька волнами двух частот, разност к-рых равна резонансной частоте пузырька, возникает отклик на разностной частоте, обусловленной нелинейностью пульсации пузырька. Метод достаточно чувствителен и позволяет обнаружить даже одиночные пузырьки, что важно, напр., в биол. исследованиях или при наблюдении за режимом работы теплообменника в атомных реакторах.

Лит.: Уайт Дж. М., Линеиные и нелинейные волны, пер. с англ., М., 1977; Нелинейная акустика. Сб. науч. трудов, под ред. В. А. Зверева, Л. А. Островского, Горький, 1980; Говяко А. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И., Нелинейная гидроакустика, Л., 1981; Наугольные К. А., Островский Л. А., О нелинейных эффектах в акустике океана, в кн.: Акустика океана, М., 1982; Красильников В. А., Крылов В. В., Введение в физическую акустику, М., 1984. К. А. Наугольных.

**НЕЛИНЕЙНАЯ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ** — общее (малоупотребительное) наименование для квантовых теорий поля (КТП), описывающих взаимодействующие поля. Разл. поля могут взаимодействовать как друг с другом, так и сами с собой (самодействие). Ур-ния взаимодействующих полей всегда нелинейны; линейные ур-ния описывают лишь свободные поля. Среди нелинейных КТП можно выделить два вида: перенормируемые и перенормируемые (см. *Перенормируемые квантовые теории поля*), причём последние могут быть полиномиальными и неполономиальными. См. *Неполиномиальные квантовые теории поля*. М. К. Волков.

**НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА**

С о д е р ж а н и е:

1. Сильные световые поля	294
2. Нелинейный отклик и нелинейные восприимчивости	295
3. Волновая нелинейная оптика. Управление продольными и поперечными взаимодействиями волн	296
4. Сильные нелинейности, нелинейные материалы	298
5. Нелинейная спектроскопия и нелинейная диагностика вещества	299
6. Параметрические процессы и параметрические преобразователи	300
7. Нелинейная динамика возбужденных световых волн в кубичной среде	301
8. Рассеяние на оптически индуцированных когерентных элементарных возбуждениях — вынужденное рассеяние	302
9. Статистическая нелинейная оптика. Классические и квантовые сжатые состояния световых полей	303
10. Нелинейный отклик в физике вещества лазерного излучения на вещество	304
11. Быстрое управление фазой и генерация фемтосекундных лазерных импульсов	304
12. Обработка информации и оптические компьютеры	304

Нелинейная оптика — раздел оптики, связанный с изучением и применением явлений, обусловленных нелинейным откликом вещества на световое поле.

Динамика электронов, атомов, молекул, конденсиров. среды, возбуждаемых световым полем, принципиально нелинейна. Нелинейным оказывается даже движение свободного релятивистского электрона

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left\{ E + \frac{1}{c} [vH] \right\}, \quad (1)$$

возбуждаемого гармонич. световой волной

$$E = E_0 = \epsilon A_1 \exp i(\omega t - k_1 r_1). \quad (2)$$

Действительно, поскольку  $v \ll E$ ,  $E \sim N$ , второй член в правой части (1) пропорционален  $E^2$ .

Решая (1) методом возмущений (положив  $v/c \ll 1$  и считая амплитуду напряжённости светового поля  $A_1$  умеренной), получим

$$r \approx r^{(1)} E + r^{(2)} E^2 + \dots \quad (3)$$

Из (3) непосредственно следует, что электрон, переизлучая поле на высших гармониках  $2\omega$ ,  $3\omega$ , обнаруживает нелинейный отклик.

Нелинейный отклик связанного электрона, как правило, гораздо сильнее; он обусловлен, в первую очередь, нелинейным характером удерживающего его силового поля. Простейшая модель, проясняющая качественную сторону дела, — классич. ангармонич. осцилятор.

Для классич. «смещения»  $x$  связанного электрона имеем ур-ние

$$\ddot{x} + \Gamma \dot{x} + \omega_0^2 x + F_{нл} = - (e/m) E, \quad (4a)$$

$$F_{нл} = \alpha x^2 + \beta x^3 + \dots \quad (4b)$$

Считая нелинейный член  $F_{нл}$  малым, выражения для наведённого дипольного момента атома или молекулы  $d = ex$  и макроскопич. поляризации  $P$  (в изотропной среде  $P = Nex$ ;  $N$  — число частиц в единице объёма) можно получить, решая ур-ние (4) методом возмущений. Тогда ф-лы для  $d$  и  $P$  имеют вид рядов по степеням поля  $E$ . Коэф. разложения оказываются тензорами второго, третьего и более высоких порядков:

$$d = d(E) = d_{лин} + d_{нл} = \hat{\chi}^{(1)} E + \hat{\chi}^{(2)} EE + \hat{\chi}^{(3)} EEE + \dots, \quad (5)$$

$$P = P(E) = P_{лин} + P_{нл} = \hat{\chi}^{(1)} E + \hat{\chi}^{(2)} EE + \hat{\chi}^{(3)} EEE + \dots \quad (6)$$

Пока в (4) можно пренебречь нелинейными членами (что характерно для хаотич. малонтенсивного излучения большинства нелазерных источников света), для  $d$  и  $P$  имеем:

$$d = d_{лин} = \hat{\chi}^{(1)} E; \quad P = P_{лин} = \hat{\chi}^{(1)} E, \quad (7)$$

$$\chi_{ij}^{(1)} = N \langle \chi_{ij}^{(1)} \rangle = \frac{n^2 - 1}{2}, \quad (7a)$$

т. е. отклик среды линеен по полю и полностью описывается линейной поляризуемостью  $\chi^{(1)}$  и линейной восприимчивостью  $\chi^{(1)}$ . [Величина  $(n^2 - 1)/2$  — лоренцевский фактор, или фактор действующего поля, характеризует действие соседних диполей.] Соотношения (7) являются квазистатич. материальными ур-ниями линейной оптики. Оптич. отклик в общем случае характеризуется набором поляризуемостей  $\hat{\chi}^{(2)}$ ,  $\hat{\chi}^{(3)}$ , ... и нелинейных восприимчивостей  $\hat{\chi}^{(2)}$ ,  $\hat{\chi}^{(3)}$ , ...

В лазерной оптике нелинейные слагаемые в (5) и (6) существенны, а обусловленные ими эффекты во мн. случаях доминируют. Более того, в «сверхсильных» световых полях мощных лазеров локальный нелинейный отклик сравнивается с линейным,  $P_{нл} \sim P_{лин}$  (см. ниже).

Иные представления о том, что законы линейной оптики, в частности суперпозиции принципа, носят приближённый характер и применимы лишь в области слабых полей, существовали и до появления лазеров. Первые прямые эксперименты по регистрации нелинейности в поглощении и преломлении света в флуоресцирующих кристаллах и стёклах были выполнены в 1920–30-х гг. С. И. Вавиловым с сотрудниками. Результатом нарушения принципа суперпозиции является известный ещё с прошлого века линейный эл.-оптич. эффект. Лежащие в его основе взаимодействие НЧ- и оптич. полей описывается квадратичным членом в разложении поляризации по полю:

$$P_{нл}(\omega) = \chi^{(2)} E_0 E_{\omega},$$

где  $E_0$  — статич. (НЧ-) электр. поле, изменяющее поляризацию (а следовательно, и показатель преломления) на оптич. частоте  $\omega$ .

Первым нелинейным эффектом, зарегистрированным с помощью лазера, стала генерация второй оптич. гармоники. В 1961 П. Франкен (P. Franken) с сотрудниками наблюдали удвоенные частоты излучения рубино-

вого лазера в кристалле кварца. Эффект описывается квадратичным по полю членом в нелинейной поляризации (6). Гармонич. поле (2) возбуждает в соответствии с (6) волну нелинейной поляризации на удвоенной частоте:

$$P_{нл}(2\omega) \sim \chi^{(2)}(2\omega) E_{\omega}^2 \sim \chi^{(2)}(2\omega) A^2 \exp i2(\omega t - k_1 r). \quad (8)$$

Эта волна — движущийся распределённый источник, переизлучающий световое поле гармоники  $E_{2\omega} = \epsilon_0 A^2 \exp i(2\omega t - k_1 r)$ .

В опытах Франкена генерация гармоник была очень слабым эффектом, к-д удвоения (относит. мощность гармоник)  $\lesssim 10^{-8}$ . Однако уже к нач. 1963 вид оптич. удвоителей достигали 20–30%. Решающую роль в этом сыграли реализация условий фазового синхронизма, согласование фазовых скоростей волн нелинейной поляризации и гармоники, осуществляющиеся при  $2k_1 = k_2$  и приводящее к синфазному сложению полей гармоники, генерирующихся в разл. участках нелинейной среды. Т. о., даже в условиях, когда локальный нелинейный эффект мал ( $\chi^{(2)} E \ll 1$ ,  $P_{нл} \ll P_{лин}$ ), накопление его на большой дистанции, управление «продольными» взаимодействиями приводит к сильному энергообмену между волнами.

Принципиальное значение для Н. о. имело создание лазеров с модулиров. добротностью (Q-фактор), позволяющих получать при длительности импульсов  $\sim 10^{-7} - 10^{-8}$  с интенсивности  $\sim 10^{10} - 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>. Сильные поля лазеров с модулиров. добротностью позволили начать исследование нелинейных эффектов, кубичных по полю, определяемых  $\chi^{(3)}$ . С помощью этих лазеров получены 3-я и 4-я оптич. гармоники (1963–64), обнаружено явление вынужденного комбинац. рассеяния (1962). Оказалось, что в сильных лазерных полях взаимодействия электронных и колебат. движений в молекулах и кристаллах приводят к фазировке колебаний; рассеяние становится когерентным, интенсивность рассеянного света возрастает на много порядков.

В 1965 впервые наблюдалась самофокусировка света, зарегистрированы «поперечные» нелинейные взаимодействия: в нелинейной среде дифракционная расходимость мощного светового пучка подавляется нелинейной рефракцией, обусловленной нелинейной добавкой к показателю преломления ( $\Delta n = n_2 I$ ,  $n_2 \sim \chi^{(3)}$ ). В том же году запущен параметрический генератор света, в к-ром взаимодействие волн на квадратичной нелинейности используется для генерации когерентного излучения, плавно перестраиваемого по частоте в широком диапазоне.

Проблемы совр. Н. о. далеко выходят за рамки физ. и прикладной оптики в их традиц. понимании. Совр. Н. о. определяют след. направления: физика оптич. нелинейности и нелинейная спектроскопия; волновая Н. о.; воздействие сильного светового поля на вещество; прикладная Н. о.

Физика оптич. нелинейности и нелинейная спектроскопия. Совр. Н. о. сталкивается с разнообразными проявлениями нелинейного отклика разл. сред, сюда входят и прямые эксперименты по регистрации поляризации вакуума в сверхсильных световых полях. Спектроскопич. методы, основанные на изучении нелинейных свойств вещества, в частности дисперсии нелинейных восприимчивостей, оказались универсальными, позволяли решать задачи, ранее недоступные оптич. технике.

Волновая нелинейная оптика. Нелинейность отклика приводит к взаимовлиянию, и т. ч. к сильному энергообмену волн с существенно разл. частотами и волновыми векторами, к нелинейным изменениям частотного и угл. спектров взаимопрозрачн. квазишлюк волн (самовоздействию). В процессе волновых взаимодействий и самовоздействий нелинейно изменяется и состояние поляризации волн — возникают поляризац. нелинейные эффекты.

Многообразные волновые взаимодействия и самовоздействие фактически определяют гл. черты поведения мощных лазерных пучков в материальной среде. Разработка эфф. методов управления продольными и поперечными нелинейными взаимодействиями позволила реализовать в оптике разнообразные эффекты нелинейной волновой динамики — параметрич. взаимодействия, ударные волны, генерацию структур, солитоны, спиральные волны, турбулентность.

Физика взаимодействия сильного света с веществом, нелинейные оптич. явления играют важную, а зачастую и решающую роль в механизмах лазерного возбуждения и релаксации в сильнонеравновесных состояниях в атомах, молекулах и конденсированных средах. На использовании оптич. нелинейности базируются и уникальные по быстрдействию (временное разрешение  $\sim 10^{-15}$  с) и спектральному разрешению методы лазерной диагностики неравновесных состояний, быстрых превращений в веществе.

Прикладная нелинейная оптика. Преобразование частотного и угл. спектров, быстрое управление амплитудой и фазой световых волн, являющиеся следствием нелинейных взаимодействий и самовоздействий, лежат в основе действия широкого класса нелинейнооптич. устройств. Кроме традиц. преобразователей частоты и параметрич. генераторов, в прикладной Н. о. разработаны системы нелинейной адаптивной оптики, эфф. компрессоры сверхкоротких световых импульсов, нестабильные и мультистабильные элементы быстродействующих цифровых и аналоговых оптич. процессоров.

Т. о., мн. проблемы Н. о. тесно переплетаются с задачами атомной и молекулярной физики, физики твердого тела, электроники и технологии. При всем многообразии направлений исследований важнейшими продолжают оставаться: физика и техника генерации сильных световых полей; физика оптич. нелинейности и разработка нелинейных материалов; разработка методов управления продольными и поперечными взаимодействиями световых волн в нелинейных средах.

Величина нелинейного эффекта определяется напряженностью светового поля, значением нелинейной восприимчивости и эфф. пространственным масштабом нелинейного взаимодействия.

### 1. Сильные световые поля

Естественный для Н. о. масштаб напряженности поля — напряженность внутриатомного поля  $E_A$ . Можно ожидать, что при  $E \approx E_A$  нелинейный отклик сравнивается по величине с линейным:

$$P_{\text{лин}}(E_A) \approx P_{\text{нл}}(E_A). \quad (9)$$

Максимальная в ряду внутриатомных полей напряженность поля в атоме водорода  $E_A \approx e/a_0^2 \approx 5 \cdot 10^9$  В/см достигается в световом пучке с интенсивностью

$$I_A = \frac{cA^2}{8\pi} = \frac{c^2}{2a_0^4} \approx 10^{17} \text{ Вт/см}^2.$$

Для получения таких интенсивностей необходимо располагать лазерными системами, генерирующими излучение мощностью  $W \approx 1$  ТВт ( $10^{12}$  Вт). Фокусировка излучения в пятно площадью  $\sigma \approx 10^{-8}$  см<sup>2</sup>, вполне реальная в видимом и ближнем ИК-диапазоне, приводит в этом случае к  $I = W/\sigma \approx 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>.

С помощью лазеров с модуляторами добротностью ( $\tau_{\text{н}} \approx 10^{-8} - 10^{-9}$  с) сверхсильные поля можно получить только в уникальных мультикилоджоульных установках, предназначенных для экспериментов по УТС. Поэтому огромное значение для Н. о. имели освоение техники генерации пико- и фемтосекундных импульсов, разработка методов сжатия лазерных импульсов, «фокусировка во времени» (рис. 1).

При  $\tau_{\text{н}} \approx 10^{-13} - 10^{-14}$  с переход к сверхсильным полям возможен при энергиях импульса 0.1 Дж.

Именно такими методами получены (1989) интенсивности  $I \approx 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>, при к-рых напряженность светового поля почти на порядок превосходит атомное поле. При  $E > E_A$  происходит радикальное изменение структуры вещества; дискретная структура атомных уровней практически исчезает, оптич. отклик определяется переходами в непрерывном спектре. Это означает, что при  $E \geq E_A$  на смену Н. о. атомов и молекул приходит нелинейная электронная физика. В действительности единицы диапазона Н. о. атомов и молекул существенно уже. Конденсированная среда, не слишком разреженный газ ионизуются при интенсивностях  $I = I_{\text{пр}} < I_A$  ( $I_{\text{пр}}$  — порог пробоя). Эффект связан с лавинным размножением свободных электронов, набирающих энергию в процессе столкновений в поле световой волны. При достижении критич. концентрации электронов  $N_{\text{кр}} \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup> возникает лавинный световой пробой (см. Оптические разряды). Возможность достичь  $N_{\text{кр}}$  определяется плотностью световой энергии; поэтому  $I_{\text{пр}} \sim 1/\tau_{\text{н}}$ , т. е. порог светового пробоя возрастает с уменьшением длительности лазерного импульса.

Конкретные значения  $I_{\text{пр}}$ , вид зависимости  $I_{\text{пр}}(\tau_{\text{н}})$  определяются прежде всего соотношением частоты света  $\omega$  и резонансной частоты вещества  $\omega_A$ .

Представления о порядках величин можно дать для существенно перерезанного случая  $\omega/\omega_A \ll 1$ . В этой ситуации пробой прозрачных кристаллов и стекол в поле импульсов длительностью  $\tau_{\text{н}} \approx 10^{-8}$  с происходит при  $I_{\text{пр}} \approx 10^{10} - 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>. При  $\tau_{\text{н}} \approx 10^{-14}$  с верх. граница интенсивностей, при к-рых конденсируется среда ещё не успевает ионизоваться, повышается до значений  $I_{\text{пр}} \approx 10^{13} - 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. При  $I = I_{\text{пр}} \approx 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> атом ионизуется за счёт туннелирования электрона в световом поле за время порядка светового периода; этим определяется предельная оптич. прочность вещества в перерезанном состоянии. При  $I > I_{\text{пр}} < I_A$  в перерезанном случае  $I_{\text{пр}} \approx (\omega/\omega_A)^2 I_A$  линейный и нелинейный отклики вещества определяются фактически откликом квазисвободных электронов.

В световом поле напряженность

$$E = E_{\text{пол}} = m\omega c/e$$

энергия осциллирующей электрона становится сравнимой с энергией покоя. Соответственно, т. н. релятивистская интенсивность

$$I_{\text{ред}} = m^2 \omega^2 c^3 / 4\pi e^2$$

характеризует границу релятивистской Н. о. свободных электронов [при  $E = E_{\text{пол}}$ ,  $v \approx c$  в (1) и вклад, обусловленный силой Лоренца, уже нельзя рассматривать как малое возмущение].

Для частот, соответствующих видимому диапазону,  $I_{\text{ред}} \approx 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> — величина, уже достигнутая в эксперименте.

Получение сверхсильных полей позволяет экспериментально наблюдать эффекты нелинейной квантовой электродинамики. В полях напряженностью  $E \approx 10^{18}$  В/см ( $I \approx 10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>) возможна генерация электронно-позитронных пар в вакууме («оптич. пробой вакуума»). Хотя достижение таких полей пока представляется проблематичным, взаимодействие уже

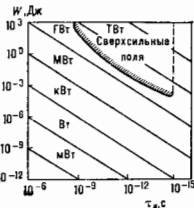


Рис. 1. Диаграмма энергии — длительности лазерного импульса  $\tau_n$ ; линиями указаны уровни равной мощности. Сверхсильным полям соответствует мощность  $> 1$  ГВт.

реализованных мощных лазерных импульсов с релятивистскими электронами может привести к наблюдению ряда принципиальных эффектов. При  $I > 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> реализуются условия наблюдения нелинейного томоновского и величинного комптоновского рассеяния; возможна регистрация влияния лазерного поля на  $\beta$ -распад. При  $I > 10^{12} - 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> возможно наблюдение черенковского излучения в вакууме, поляризованном мощной световой волной.

## 2. Нелинейный отклик и нелинейные восприимчивости

Нелинейный отклик свободных и связанных «оптич.» электронов — универсальная, но не единственная причина возникновения нелинейных оптич. явлений. Существенными оказываются нелинейные колебания многотомных молекул и кристаллич. решёток, возбуждение светом явлений дрейфа, диффузии зарядов в кристаллах (фоторефрактивный эффект), индуцированная световой волной ориентация анизотропных молекул в жидкостях и жидких кристаллах (оптический Керра эффект), электрострикция, разл. тепловые эффекты и т. п. Перечисленные механизмы приводят к появлению оптич. нелинейностей, существенно различающихся по величине и времени установления нелинейного отклика  $\tau_{нл}$ . Для набв. быстрой нерезонансной электронной поляризации  $\tau_{нл} \leq 10^{-14}$  с, для инерционной тепловой нелинейности  $\tau_{нл} > 10^{-9}$  с.

Слабый локальный нелинейный отклик. В большинстве практически интересных случаев локальный нелинейный отклик много меньше линейного ( $P_{нл} \ll P_{лин}$ ) и нелинейные свойства среды хорошо описываются разложениями (5), (6), набором гиперполяризуемостей  $\chi^{(n)}$  и нелинейных восприимчивостей  $\chi^{(n)}$ .

В световом поле

$$E = \sum_m E_m = \sum_m e_m A_m \exp i(\omega_m t - \mathbf{k}_m r)$$

возникает бесконечный набор волн нелинейной поляризации на частотах  $\omega = \sum_{m=1}^n \omega_m$

$$P_{нл}(\omega) = \hat{\chi}^{(n)} E_1 E_2 E_3 \dots E_n, \quad (10)$$

где определяющая макроскопич. нелинейный отклик спектральной компонента тензора  $(n+1)$ -го ранга  $\hat{\chi}^{(n)}$ :

$$\hat{\chi}_{ijk \dots n+1}^{(n)}(\omega = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \dots \pm \omega_n) = N \langle \hat{\chi}_{ijk \dots n+1}^{(n)}(\omega) \rangle L^{(n)}; \quad (11)$$

здесь  $\langle \hat{\chi}_{ijk \dots n+1}^{(n)} \rangle$  — усреднённый по ориентациям атомов или молекул тензор гиперполяризуемости,  $L^{(n)}$  — фактор локального поля — поправка, учитывающая диполь-дипольное взаимодействие (обобщение лоренцевского фактора)

$$L^{(n)} = L(\omega_1) L(\omega_2) \dots L(\omega_n) = \left[ \frac{n_0(\omega_1) + 2}{3} \right] \cdot \left[ \frac{n_0(\omega_2) + 2}{3} \right] \cdot \dots \cdot \left[ \frac{n_0(\omega_n) + 2}{3} \right], \quad (12)$$

$n_0(\omega_m)$  — линейный показатель преломления. Ф-ла (11) является естеств. обобщением соотношения (7а). Расчёт величин  $\chi^{(n)}$  и  $\hat{\chi}^{(n)}$  должен основываться на макроскопических теоретич. моделях. Информацию о нелинейном отклике даёт и феноменологич. теория, апеллирующая к общим свойствам симметрии среды, рассматривающая такие простые модельные системы, как классич. ангармонич. осциллятор, квантовая *двухуровневая система*.

Квадратичные нелинейные восприимчивости. Младший нелинейный член в разложении (6) — квадратичный по полю  $P_{нл} = \hat{\chi}^{(2)} E E$ . Квадратичная нелинейная восприимчивость  $\chi_{ijk}^{(2)}$  — тензор 3-го ранга; поэтому

оптич. эффекты, квадратичные по полю, возникают только в средах, не имеющих центра симметрии.

В квадратичной среде бигармонич. световое поле

$$E = E_1 + E_2 = e_1 A_1 \exp i(\omega_1 t - \mathbf{k}_1 r) + e_2 A_2 \exp i(\omega_2 t - \mathbf{k}_2 r) \quad (13)$$

возбуждает волны нелинейной поляризации на частотах  $2\omega_1, 2\omega_2, \omega_1 \pm \omega_2$ , являющихся результатом трёхчастотных ( $\omega_1, \omega_2, \omega_1 \pm \omega_2$ ) взаимодействий вида  $\omega = \omega_i \pm \omega_j$  ( $i, j = 1, 2$ ). Соответствующие спектральные компоненты тензора восприимчивости  $\chi^{(2)}(2\omega_i)$ ,  $\chi^{(2)}(\omega_1 \pm \omega_2)$  связаны с быстрым (электронным) механизмом нелинейного отклика, для к-рых  $\tau_{нл} \leq \omega_i^{-1} \approx 10^{-14}$  с. Эти процессы приводят к модуляции показателя преломления с оптич. частотой. Набв. важных среди них — нерезонансный величинный отклик связанных оптич. электронов. Пользуясь (9), можно оценить  $\chi^{(2)}$ :

$$\chi^{(1)} E_a \approx \chi^{(2)} E_a^2; \quad \chi^{(1)} \approx 1; \quad \chi^{(2)} \sim E_a^{-1}. \quad (14)$$

Если взять для  $E_a$  значение для атома водорода, то  $\chi^{(2)} \sim 10^{-7}$  [СГС]. Реальные значения  $\chi^{(2)}(2\omega)$  (в видимом диапазоне) для диэлектриков лежат в пределах от  $10^{-8}$  [СГС] (кварц) до  $1,7 \cdot 10^{-8}$  СГС для одного из набв. нелинейных кристаллов  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_2\text{O}_7$ . Существенно большие значения  $\chi^{(2)}(2\omega)$  в полупроводниках; в GaAs на  $\lambda_1 = 1,06$  мкм  $\chi^{(2)}(2\omega) \approx 5,2 \cdot 10^{-7}$  СГС; в кристалле Те в ИК-диапазоне ( $\lambda = 10,6$  мкм)  $\chi^{(2)} \approx 2,2 \cdot 10^{-6}$  СГС. Т. о., в средах, линейные восприимчивости к-рых различаются меньше чем на порядок, различие в величинах нелинейного отклика достигает почти четырёх порядков. Для нелинейностей более высокого порядка по полю сказанное проявляется ещё сильнее (см. ниже). Количеств. расчёт  $\chi^{(2)}$  кристаллов основывается в большинстве случаев на полупроводниковых моделях. Структуру квадратичного нелинейного отклика можно определить с помощью модели классич. ангармонич. осциллятора. Подставляя в (4б)  $P_{нл} = \alpha x^2$  и подставляя в (4а) поле (13), методом возмущений получим  $d = \psi^{(1)} E + \psi^{(2)} E^2$  и

$$\psi^{(2)}(\omega_1 \pm \omega_2) \equiv \psi^{(2)}(\omega_1 \pm \omega_2, \omega_1, \omega_2) = -\frac{\alpha e^2}{m^2} R(\omega_1) R(\omega_2) R(\omega_1 \pm \omega_2), \quad (15)$$

где  $R(\omega_i) = (\omega_i^2 - \omega_i^2 - i\omega_i \Gamma)^{-1}$  — резонансные множители,  $\Gamma$  — полуширина линии поглощения. Тогда для  $\chi^{(2)}$  [ср. (11)] получим:

$$\chi^{(2)}(\omega_1 \pm \omega_2) = N \psi^{(2)}(\omega_1 \pm \omega_2) \times \left[ \frac{n^2(\omega_1 \pm \omega_2) + 2}{3} \right] \left[ \frac{n^2(\omega_1) + 2}{3} \right] \left[ \frac{n^2(\omega_2) + 2}{3} \right], \quad (15a)$$

поскольку в кристалле элементарные «ячейки» ориентированы одинаково. К аналогичным ф-лам для  $\psi^{(1)}$  и  $\chi^{(2)}$  приводит и модель двухуровневой системы, в к-рой вместо классич. фактора  $D = \alpha e^2/m^2$  является произведение трёх матричных элементов переходов

$$\chi^{(2)}(\omega_1 \pm \omega_2) = DR(\omega_1 \pm \omega_2) R(\omega_1) R(\omega_2) L(\omega_1 \pm \omega_2) \times L(\omega_1) L(\omega_2). \quad (16)$$

Кубичная нелинейная восприимчивость  $\chi_{ijkl}^{(3)}$ , являясь тензором 4-го ранга, отлична от нуля в центросимметричных средах: в газах, жидкостях, аморфных и кристаллич. твёрдых телах. В этих средах в результате четырёхчастотных (четырёхчастотных) взаимодействий вида  $\omega = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_k$  ( $i, j, k = 1, 2, 3$ ) бигармонич. поле (13) возбуждает широкий спектр волн нелинейной поляризации на комбинац. частотах и гармониках  $3\omega_1, 3\omega_2, 2\omega_1 \pm \omega_2, 2\omega_2 \pm \omega_1$  и т. п. Кубичные восприимчивости  $\chi_{ijkl}^{(3)}$  ( $3\omega_1, \omega_1, \omega_1, \omega_1$ ),  $\chi_{ijkl}^{(3)}(2\omega_1 \pm \omega_2, \omega_1, \omega_1 \pm \omega_2)$  и т. п. для сильно различающихся

частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  обусловлены малоинерционными (напр., электронными) механизмами нелинейного отклика. Для грубой оценки спектральной компоненты  $\chi^{(3)}(\omega)$ , связанной с резонансным электронным откликом конденсиров. среды, можно полагать [ср. с (14)]  $\chi^{(3)}(\omega) \sim E_a^{-2}$ . Оценка  $\chi^{(3)}(\omega) \approx 10^{-13} - 10^{-14}$  СГС близка к значениям, измераемым в оптических прозрачных жидкостях и диэлектриках.

Поскольку  $\chi^{(3)}$  отлична от нуля в газах, в её поведение гораздо сильнее, чем в  $\chi^{(2)}$ , проявляются индивидуальные свойства атомов и молекул. Особенно ярко они выражены в резонансных свойствах  $\chi^{(3)}$  (для разреженного газа  $\chi^{(3)} = N\gamma^{(3)}$ ). На рис. 2 приведены теоретич. график дисперсии  $\gamma^{(3)}$  и диаграмма энергетич. уровней для атомов Na. Отчётливо видны сильные возрастания кривых восприимчивости вблизи резонансов.

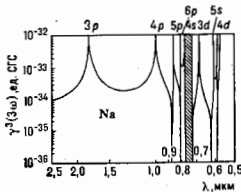


Рис. 2. Теоретические значения кубической гиперполяризуемости  $\chi^{(3)}(\omega)$  атома Na, ответственной за генерацию третьей гармоники в зависимости от длины волны основного излучения  $\lambda$ .

Четырёхчастотные нелинейные взаимодействия на кубической нелинейности приводят не только к генерации волн на новых частотах, но и к возникновению волн нелинейной поляризации на частотах исходных волн:

$$\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3; \quad \omega_5 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3;$$

$$P_{нл4}(\omega_4) = \chi^{(3)}(\omega_4)E(\omega_1)E(\omega_2)E^*(\omega_3);$$

$$P_{нл5}(\omega_5) = \chi^{(3)}(\omega_5)E(\omega_1)E(\omega_2)E^*(\omega_3).$$

В результате такого самовоздействия, при кроссмодуляции, возникает нелинейная добавка  $n_2$  к показателю преломления для волны частоты  $\omega_1$ .

Полный показатель преломления кубической среды

$$n = n_0 + n_2 I; \quad n_2 \sim \chi^{(3)}(\omega). \quad (17)$$

Если выразить  $n_2$  в [см<sup>2</sup>/кВт], то

$$n_2 [\text{см}^2/\text{кВт}] = (2\pi/n_0)^2 \chi^{(3)}(\omega) \text{ СГС}.$$

Обусловленная быстрым резонансным откликом оптич. электронов нелинейная добавка  $n_2$  относительно невелика. Полагая  $\chi^{(3)}(\omega) \approx 10^{-14}$  СГС, имеем  $n_2 \approx 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/кВт; таковы прибл. значения  $n_2$  для жидкостей и кристаллов и жидкостей. В таком случае даже для интенсивностей, близких к пробойным,  $I \approx I_{пр}$ ,  $\Delta n = n_2 I_{пр} \ll n_0$ .

Имеется много других, хотя и более инерционных, механизмов, приводящих к существенно более сильной нелинейности показателя преломления. К ним относятся резонансные нелинейности в полупроводниках (экситонные резонансы в двумерных структурах), фоторефрактивный эффект в неорганич. кристаллах, ориентация анизотропных молекул и световом поле и оптич. нагрев среды. Диапазон значений нелинейного параметра  $n_2$  превышает десять порядков (рис. 3). Несмотря на существ. различие физ. механизмов нелинейности, многочисл. данные весьма хорошо укладываются на прямые  $n_2 \sim \tau_{нл}^2$ ; возрастание величины  $n_2$  сопровождается увеличением инерционности отклика.

К ориентат. механизмам в жидких кристаллах, приводящим к  $n_2 > 0,1$  см<sup>2</sup>/кВт, с полным основанием применим термин «гигантские оптич. нелинейности».



Рис. 3. Значения нелинейного коэффициента  $n_2$  для оптических материалов на плоскости  $n_2$ ,  $\lambda_{нл}$ .

**Выше нелинейности.** Квадратичная и кубическая нелинейности доминируют в подавляющем большинстве практически важных случаев. Нелинейности более высокого порядка быстро убывают с номером  $n$ ,  $\chi^{(n)} \sim E_a^{-(n-1)}$  (под  $E_a$  следует понимать нек-рое эфф. «атомное» поле, различное для разных механизмов нелинейности).

В кристаллах в поле интенсивных сверхкоротких импульсов зарегистрированы эффекты, обусловленные быстрыми (электронными) нелинейностями  $P_{нл}^{(4)} \sim \chi^{(4)} E^4$  и  $P_{нл}^{(5)} \sim \chi^{(5)} E^5$ . В атомарных газах при интенсивностях  $I \sim 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> измерены нелинейные эффекты, обусловленные  $P_{нл}^{(3)} \sim \chi^{(3)} E^3$ .

**Нелинейный отклик в сверхкратких полях.** В сверхкратких световых полях ( $E \gtrsim E_a$ ) описание нелинейного отклика, базирующееся на методе возмущений, разложения нелинейной поляризации в ряд по степеням поля, теряет силу; в значит. мере утрачивает смысл и понятие нелинейной восприимчивости. В экспериментах по генерации оптич. гармоник в атомах инертных газов при интенсивностях  $I \sim 10^{14} - 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> были зарегистрированы четвёртые гармоники вплоть до 24-й. Теоретическая интерпретация эффекта базируется на численном анализе нелинейного отклика одноэлектронного атома, никак не связанном с методом возмущений.

### 3. Волновая нелинейная оптика. Управление продольными и поперечными взаимодействиями волн

Распространение световых волн в слабонелинейной среде описывается неоднородным волновым уравнением

$$\left[ \nabla^2 \{E\} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P_{нл}}{\partial t^2} \right] = - \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P_{нл}}{\partial t^2}, \quad (18)$$

где внеш. силой является волна нелинейной поляризации  $P_{нл}(r, t)$ . Последняя возбуждает вынужденную эл.-магн. волну, имеющую те же частоту и волновой вектор, что и волна нелинейной поляризации. Интерференция вынужденных волн со свободными волнами среды определяет динамику развития нелинейного волнового процесса во времени и в пространстве. Поскольку характер интерференции свободных и вынужденных волн существенно зависит от дисперсии среды, дисперсионные параметры решающим образом влияют на формирование нелинейных волн. В электродинамике сильнодиспергирующих слабонелинейных сред приятно выделять нелинейные взаимодействия и самодействие волн, обусловленные зависимостью комплексного показателя преломления от интенсивности.

Строгое разграничение нелинейных волновых процессов на взаимодействие и самовоздействие справедливо лишь для плоских монохроматич. волн, для  $k$ -рой самовоздействия проявляются как самодифракц. изменения поглощения и фазовой скорости волны. Для реальных модулированных во времени и пространстве световых волн эта классификация условна. Самовоздействия волновых пакетов и пучков в кубичной среде (самодифракц. изменения формы модуляции) обусловлены четырёхфотонными взаимодействиями разл. компонент частотного и угл. спектров, продольными и поперечными взаимодействиями. Однако термины «взаимодействия» и «самовоздействия» широко используются и для модулиров. волн. В совр. Н. о. говорят о взаимодействиях и «самовоздействиях» широко используются и для модулиров. волн. В совр. Н. о. говорят о взаимодействиях и «самовоздействиях» широко используются и для модулиров. волн. В совр. Н. о. говорят о взаимодействиях и «самовоздействиях» широко используются и для модулиров. волн.

Дело не только в терминологии, существенно различаются теоретич. подходы, физ. образы, используемые при исследовании взаимодействий и самовоздействий. В описании взаимодействий первоочередный интерес представляет динамика распределения энергии по спектру, а в описании самовоздействия главное — поиск автомодельных решений, стационарных волн, неустойчивостей и т. п.

**Правильнейшие уравнения нелинейной геометрической оптики; связанные волны.** Для большинства практически интересных задач Н. о. ур-ние (18) можно упростить, пользуясь методом медленно меняющихся амплитуд. Для плоских волн, распространяющихся в слабонелинейной среде,

$$E = \sum_n A_n(t, r) \exp(i\omega_n t - \mathbf{k}_n r), \quad (19)$$

в первом приближении теории дисперсии полагаем, что комплексные амплитуды  $A_n$  медленно изменяются на длине волны  $\lambda_n$  и периоде  $T_n = 2\pi/\omega_n$ , вместо (6), (18) получаем систему  $n$  связанных ур-ний 1-го порядка

$$S_n [e_n |k_n e_n] \frac{\partial A_n}{\partial t} + [e_n |k_n e_n] \nabla A_n + (e_n \hat{\alpha} e_n) A_n + P_{нл}(\omega_n) f_n(r) = 0, \quad (20)$$

где  $P_{нл}(\omega_n)$  — спектральные компоненты нелинейной поляризации на частоте  $\omega_n$ ;  $\hat{\alpha}$  — тензор, описывающий потери в среде;  $S_n$  — лучевой вектор;  $f_n(r)$  — фактор, описывающий интерференцию свободных и вынужденных волн.

**Дифракция, дисперсионное расплывание волновых пакетов.** Наиб. адекватна нелинейным задачам югослав. трактовка дифракции (см. *Дифракция волн*). Её матем. аппарат никак не связан с принципом суперпозиции и базируется на параболич. ур-нии для комплексной амплитуды (см. *Волны*), описывающем «поперечную» диффузию поля, что тесно связано с методом медленно меняющихся амплитуд.

Системой связанных параболич. ур-ний

$$[e_n |k_n e_n] \nabla A_n + \frac{i}{2} \Delta_{\perp} A_n + (e_n \hat{\alpha} e_n) A_n + P_{нл}(\omega_n) f_n(r) = 0 \quad (21)$$

описывает распространение монохроматич. волновых пучков в нелинейной среде. Аналогичные по структуре ур-ния описывают и взаимодействия плоских волновых пакетов в нелинейной диспергирующей среде. Во втором приближении теории дисперсии, рассматривая для простоты плоский пакет в изотропной среде, получим параболич. ур-ние вида

$$\frac{\partial A}{\partial z} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial \eta^2} + \hat{\alpha} A + P_{нл}(\omega_n) f_n(z) = 0, \quad (21a)$$

где  $\eta = t - z/u$ ,  $u$  — групповая скорость пакета.

**Локальные и накапливающиеся нелинейные эффекты.** В протяжённой среде, характерный размер  $k$ -рой существенно превышает длину волны, аффертичность нелинейного взаимодействия определяется величиной локального нелинейного отклика (величиной  $\sim \chi^{(2)E}$  в квадратичной среде и  $\chi^{(3)E^2}$  — в кубичной) и условиями интерференции свободных и вынужденных волн.

Сильные нелинейные взаимодействия (сильный энергообмен между взаимодействующими волнами) удаётся получить и в слабонелинейной среде, в  $k$ -рой  $\chi^{(2)E} \ll 1$ ,  $\chi^{(3)E^2} \ll 1$ . Малость локального нелинейного отклика компенсируется организацией накапливающегося взаимодействия. Последнего можно добиться за счёт подбора дисперсионных свойств среды. Пример этого — генерация 2-й оптич. гармоники в двулучепреломляющем кристалле. В приближении геом. оптики система связанных ур-ний (20) сводится к двум ур-ниям 1-го порядка для амплитуд осн. волны  $A_1$  и 2-й гармоники  $A_2$  (без учёта потерь):

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i}{u_1} \frac{\partial A_1}{\partial t} &= -i\beta_1 A_1 A_2^* \exp(i\Delta k z); \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{i}{u_2} \frac{\partial A_2}{\partial t} &= -i\beta_2 A_1^2 \exp(-i\Delta k z). \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь  $u_1, u_2$  — групповые скорости,  $\beta_1 = 2\pi(e_1 \chi^{(2)} e_2 e_1) \omega^2 / k_1 c^2$ ,  $\beta_2 = \pi(e_2 \chi^{(3)} e_1 e_1) \omega^2 / k_2 c^2$  — коэф. нелинейной связи, ось  $x$  направлена вдоль  $k_1$ ,  $A_i = \rho_i \exp(i\varphi_i)$ . Расстройка волновых векторов  $\Delta k = k_2 - 2k_1$  определяет картину интерференции свободной (волновое число  $k_2$ ) и вынужденной (волновое число  $2k_1$ ) волн. Генерация гармоники наиб. аффертивна в условиях фазового и группового синхронизма, когда

$$\Delta k = 0; \quad u_1 = u_2. \quad (23)$$

Тогда для вещественных амплитуд  $\rho_1, \rho_2$  из (22) получаем ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ):

$$\begin{aligned} \rho_1(\eta, z) &= \rho_{10}(\eta) \operatorname{sech}(\beta \rho_{10} z), \\ \rho_2(\eta, z) &= \rho_{10}(\eta) \operatorname{th}(\beta \rho_{10} z). \end{aligned} \quad (24)$$

Графики решений (20), (24) представлены на рис. 4(a); видно, что при выполнении условия (23) вся энергия основной волны переходит в гармонику, реализуется накапливающееся взаимодействие; оптич. удвоитель частоты

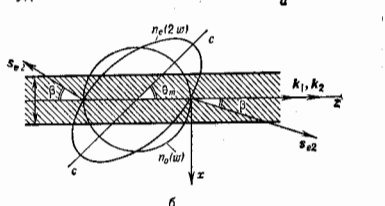


Рис. 4. Удвоение частоты света: а — пространственное изменение вещественных амплитуд  $\rho_1, \rho_2$  в условиях фазового синхронизма; б — схема реализации условий фазового синхронизма в двулучепреломляющем кристалле. Приведены сечения поверхности показателя преломления для обыкновенной  $n_0(\omega)$  и необыкновенной  $n_2(\omega)$  волн.

обладает кпд  $\sim 100\%$ . Если же расстройка  $\Delta k$  велика, быстро осциллирующий член в правых частях уравнений (22) практически полностью подавляет

нелинейный эффект (см. также *Взаимодействие световых волн*).

**Мелкомасштабные и крупномасштабные накалывающиеся продольные взаимодействия.** Условия фазового синхронизма в оптике наиб. эффективно реализуются в двулучепреломляющих кристаллах. Имитация отсутствия дисперсии  $\Delta k = k_2 - 2k_1 = (2\omega/c)n(2\omega) - n(\omega) = 0$  возможна, если волны основной частоты и гармоники поляризованы ортогонально (рис. 4,б). Пересечение поверхности  $n_2(2\omega)$  и  $n_1(\omega)$  определяет конус направлений, вдоль к-рых  $n_2(2\omega) = n_1(\omega)$ . Пространственный масштаб накалывающегося продольного взаимодействия плоских гармоник, волн на частотах  $\omega$  и  $2\omega$ , распространяющихся вдоль такого направления,  $L_1 = \Delta k^{-1} \rightarrow \infty$ . Однако неизбежно присутствующие временная и пространственная модуляции волны приводят к ограничению величины  $L_1$ . Тем не менее и в этой ситуации продольные взаимодействия удаётся сделать крупномасштабными, если  $L_1 > L_{\text{пл}} \approx \beta^{-1/2} \cdot 10^3$ . Здесь т. н. нелинейная длина  $L_{\text{пл}}$  — характерное расстояние, на к-ром > 50% энергии осн. волны переходит в гармонику в условиях фазового синхронизма.

Крупномасштабные продольные взаимодействия удаётся реализовать в пучках мощных лазеров, макс. вид удвоитель частоты достигает  $\sim 80-90\%$ . Если разность  $n(2\omega) - n(\omega)$  определяется естеств. дисперсией среды, то  $L_1 \approx \Delta n^{-1}$  не превышает  $10^{-3}$  см и даже для световых волн, близких к пробойным, продольные взаимодействия остаются мелкомасштабными.

Управление поперечными взаимодействиями. Для эффектов, приводящих к нелинейному изменению угл. спектра, таких как самофокусировка и самодифракция, генерация диссипативных структур, пространственная стабильность и мультистабильность, определяющую роль играет характерный масштаб поперечных взаимодействий  $L_1$ . Мелкомасштабные поперечные взаимодействия ( $L_1 \ll d$  — поперечного размера светового пучка) возникают за счёт дифракции («диффузия» лучевой амплитуды), диффузии частиц нелинейной среды. В системах с оптич. обратной связью, в нелинейных резонаторах с т. н. дв. мерной обратной связью, используя относительно несложные преобразования светового поля, можно получить  $L_1 \approx d$  (см. раздел 7).

**4. Сильные нелинейности, нелинейные материалы**

Слабый эффект генерации 2-й оптич. гармоники был открыт в естеств. кристалле кварца. Получение кид оптич. удвоителя частоты, достигающего десятков процентов, стало возможным только за счёт использования искусственно выращенных кристаллов, позволяющих реализовать условия синхронизма. Поэтому большая величина нелинейной восприимчивости — не единств. требование к эфф. нелинейному материалу. Обычно необходима совокупность таких свойств, как нелинейность, двулучепреломление, область прозрачности, оптич. прочность и т. п. Возможности варьирования величин квадратичной нелинейной восприимчивости  $\chi^{(2)}$ , обусловленной быстрой электронной нелинейностью, относительно невелики. Анализ эксперим. данных позволяет сформулировать полумпирич. закономерность, связывающую спектральные компоненты квадратичной восприимчивости  $\chi^{(2)}$  с компонентами линейной восприимчивости  $\chi^{(1)}$ .

Она оказывается:

$$\chi_{ijk}^{(2)}(\omega_3 = \omega_1 + \omega_2) = \Delta_{ijk} \chi_{ijl}^{(1)}(\omega_3) \chi_{klm}^{(1)}(\omega_1) \chi_{lmk}^{(1)}(\omega_2), \quad (25)$$

где коэф.  $\Delta_{ijk} \approx 10^{-8}$  СГС практически постоянны для широкого класса кристаллов. Согласно (25), оптич. материалы с высокими значениями линейного показателя преломления должны обладать и высокой квадратичной нелинейностью.

Наиб. значения  $\chi^{(2)}$ , полученные в кристалле  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  в видимом диапазоне ( $\chi^{(2)} \approx 10^{-8}$

СГС) и в кристалле Те в ИК-диапазоне ( $\chi^{(2)} \approx 2.2 \cdot 10^{-8}$  СГС) ещё в 1960-х гг., практически не были превзойдены и в 1980-х гг. (табл.). Это не свидетельствует, однако, об отсутствии прогресса в разработке материала с квадратичной нелинейностью. Наиболее яркие достижения получены в разработке нелинейных кристаллов для преобразования широкоопертурных пучков импульсных лазеров для установок УТС и в разработке кристаллов для преобразования излучения с высокой ср. мощностью. Удвоитель частоты на кристалле калий — титанил фосфата (КТР) обладает  $\approx 60\%$  при средней мощности лазерного излучения  $\sim 20$  Вт.

Неорганические кристаллы для нелинейнооптических преобразователей

Кристаллы	$\chi^{(2)}(2\omega) \cdot 10^8$ СГС	Область прозрачности, мкм
KDP( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )	1,13	0,2—4,2
LiIO <sub>3</sub>	13,38	0,3—4,5
LiNbO <sub>3</sub>	13,86	0,4—4,5
Ba <sub>2</sub> NaNb <sub>5</sub> O <sub>15</sub>	17,45	0,4—4,5
КТР(КТiOPO <sub>4</sub> )	15,54	0,35—4,0
VBO( $\beta\text{-Ba}_2\text{VO}_4$ )	3,25	0,195—3,5

Представление о диапазоне значений кубичной нелинейной восприимчивости в совр. нелинейных материалах даёт диаграмма рис. 3. Несмотря на разнообразие физ. механизмов нелинейности, можно чётко выделить экз. принципы, лежащих в основе поиска и разработки сильнонелинейных материалов.

Величина кубичной восприимчивости [ср. (11), (16)] определяется произведением трёх факторов — фактора, характеризующего величину матричных элементов (дипольных моментов), —  $D^{(3)}$ , вовлечённых в нелинейный процесс, их резонансного вклада  $R^{(3)}$  и фактора локального поля  $L^{(3)}$ :  $\chi^{(3)} \sim D^{(3)} R^{(3)} L^{(3)}$ . Управление каждым из них приводит к значительным результатам в разработке материалов с кубичной нелинейностью.

Управлять фактором  $D^{(3)}$  можно за счёт дelokализации электронных состояний, ибо осн. вклад в линейную и нелинейную поляризуемость дают субякобинские электроны. Пример сильно дelokализованных состояний —  $\pi$ -электроны в органич. молекулах с сопряжёнными связями. С увеличением числа сопряжённых связей — дelokализацией электронов — в молекулах полимеров возрастает поляризуемость  $\chi^{(3)}$  (рис. 5).

Эфф. использование резонансов, описываемых фактором  $R^{(3)}$  (рис. 2), приводит также к получению сильных кубических нелинейностей (напр., вблизи экзитонных резонансов в полупроводниковых сверхрешётках). Весьма разнообразны возможности увеличения

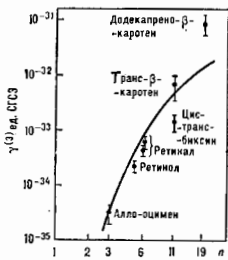


Рис. 5. Зависимость гиперполяризуемости  $\chi^{(3)}$  от числа двойных связей в молекулах полимеров; точки — эксперимент, сплошная линия — теория.

$\chi^{(3)}$  за счёт легирования кристаллов и стёкол, использование кластерных систем, включая кластеры на границах раздела. На шероховатых поверхностях металлов и полупроводников действующие поле может возрастать, по крайней мере, на два порядка.

5. Нелинейная спектроскопия и нелинейная диагностика вещества

Традиционным предметом спектроскопии до появления лазеров было исследование дисперсии действительной и мнимой частей линейной восприимчивости  $\chi^{(1)}(\omega)$ . В соответствии с этим, говоря о нелинейной спектроскопии, часто имеют в виду методы и результаты исследований частотной зависимости нелинейного отклика вещества или — для слабеющей среды — частотной зависимости нелинейных восприимчивостей. Фактически предмет и методы современного нелинейной спектроскопии шире и разнообразнее. Быстрый прогресс техники генерации коротких световых импульсов (длительностью всего в неск. световых периодов, фемтосекундные световые импульсы) привёл к разработке эфф. методов исследования нестационарного нелинейного отклика вещества на импульсное оптич. возбуждение. Эту спектроскопию, альтернативную традиционной «частотной» (frequency-domain) спектроскопии, принято называть временной (time-domain) спектроскопией. Совр. нелинейная лазерная спектроскопия включает и нелинейную спектроскопиаграфию, изучающую частотную зависимость нелинейного отклика нестационарных сред; имеется в виду частотная спектроскопия с временным разрешением. Помимо информации о новых (нелинейных) параметрах вещества, нелинейная спектроскопия открывает принципиально новые возможности извлечения данных, являющихся традиц. предметом линейной спектроскопии, — данных о положении и структуре спектральных линий, сечениях рассеяния и т. п.; один из ярких примеров — свободная от доплеровского уширения двухфотонная атомная и молекулярная спектроскопия.

Хотя нелинейная спектроскопия в принципе имеет дело с бесконечным числом новых параметров — нелинейных восприимчивостей разл. порядков  $\chi^{(2)}, \dots, \chi^{(n)}$ , фактически в большинстве применяемых методов (когерентная активная спектроскопия рассеяния света, спектроскопия двухфотонного поглощения, нелинейная поляризац. спектроскопия) используются резонансы в кубичной нелинейной восприимчивости  $\chi_{ijk}^{(3)}(\omega_i; \omega_1, \omega_2, \omega_3)$ , к-рая стала одной из важнейших характеристик материальных сред.

Примером может служить когерентная спектроскопия комбинац. рассеяния света, или, как её часто называют, КАРС-спектроскопия (когерентная антистоксова рамановская спектроскопия). Поднимающиеся альтернативному запрету комбинац. резонансы (см. *Комбинационное рассеяние света*) в нелинейном отклике проявляются как резонансы в кубич. восприимчивости. Согласно классич. модели комбинац. рассеяния, поляризуемость молекулы

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{\partial \gamma}{\partial Q} Q + \dots \quad (26)$$

где  $Q$  — смещение ядер, для к-рого ур-ние движения имеет вид

$$\ddot{Q} + 2\Gamma\dot{Q} + \Omega^2 Q = \frac{1}{2M} \frac{\partial \gamma}{\partial Q} E^2. \quad (27)$$

В соответствии с (26), (27) в поляризации  $P$  появляется член, кубичный по полю. Действительно,

$$P = P_L + P_{NL} = \gamma(Q)E = \gamma_0 E + \frac{\partial \gamma}{\partial Q} QE,$$

$$P_{NL} \sim \left(\frac{\partial \gamma}{\partial Q}\right)^2 E^2.$$

Если на среду действует бигармонич. поле вида (13), в результате четырёхфотонных взаимодействий на кубич. нелинейности возникает, в частности, волна поляризации, а следовательно, и когерентное световое поле (его когерентность определяется целиком когерент-

ностью накачки) на частоте  $\omega_a = \omega_1 + \omega_1 - \omega_2 = 2\omega_1 - \omega_2$ .

Соответствующая кубич. восприимчивость

$$\chi_{ijk}^{(3)}(\omega_a; \omega_1, \omega_1; -\omega_2) = NL^2 \chi_{ijk}^{(3)}(\omega_a; \omega_1, \omega_1; -\omega_2), \quad (28)$$

$$\gamma^{(3)} = \frac{1}{24M} \cdot \left(\frac{\partial \gamma^{(1)}}{\partial Q}\right)^2 \cdot \frac{1}{\Omega^2 - (\omega_1 - \omega_2)^2 - 2i\Gamma(\omega_1 - \omega_2)}.$$

Частотная КАРС-спектроскопия основана на измерении зависимости интенсивности антистоксова сигнала (рис. 6, а)

$$I_a(\omega_a) \sim |\chi^{(3)}(\omega_a; \omega_1, \omega_1; -\omega_2)|^2 |A_1 A_2|^2 \quad (29)$$

от разности частот  $\omega_1 - \omega_2$ . Она даёт традиц. данные о комбинационных (рамановских) резонансах; чувствительность и спектральное разрешение при этом существенно превосходят таковые для спектроскопии



Рис. 6. Схема частотной (а) и временной (б) КАРС-спектроскопии комбинационных резонансов в кубической восприимчивости  $\chi^{(3)}$ .

спонтанного комбинац. рассеяния. Вместе с тем КАРС-спектроскопия оказывается и источником принципиально новой информации, поскольку кубич. восприимчивость в (29) складается из неск. составляющих — помимо резонансной восприимчивости  $\chi_n^{(3)}$ , связанной с колебат. резонансом (28), вклад в антистоксов сигнал дают четырёхфотонные процессы, развивающиеся на быстрой нерезонансной электронной нелинейности  $\chi_{nk}^{(3)}$  (см. *Активная лазерная спектроскопия*).

Принцип временной нелинейной спектроскопии комбинац. рассеяния (нестационарной КАРС-спектроскопии) поясняет рис. 6(б). Комбинац. резонанс возбуждается двумя короткими лазерными импульсами, разность ср. частот излучения к-рых  $\omega_1 - \omega_2$  близка к частоте  $\Omega$ . Короткий зондирующий импульс  $E_p$  с задержкой по отношению к возбуждающим импульсам используется для измерения кинетики затухания нелинейного отклика.

Кубич. нелинейный отклик на монохроматич. поле

$$P^{(3)} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \chi^{(3)}(t_1, t_2, t_3) E(t - t_1) E(t - t_1 - t_2) \times \\ \times E(t - t_1 - t_2 - t_3) dt_1 dt_2 dt_3, \quad (30)$$

где  $E = E_1 + E_2 + E_{np}$ .

Измеряемая в частотной нелинейной спектроскопии спектральная компонента кубич. нелинейной восприимчивости  $\chi^{(3)}(\omega_a)$  является, очевидно, трёхмерным фурье-образом фигурирующей в (30) нелинейной ф-ции отклика  $\chi^{(3)}(t_1, t_2, t_3)$ :

$$\chi^{(3)}(\omega_a; \omega_{np}; \omega_1; -\omega_2) = \frac{1}{4} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \chi^{(3)}(t_1, t_2, t_3) \exp[i(\omega_{np} t_1 + \\ + \omega_1 t_2 - \omega_2 t_3)] dt_1 dt_2 dt_3. \quad (34)$$

При исследовании однородно уширенного комбинац. резонанса частотная и временная КАРС-спектроскопия



представляет собой альтернативные методы извлечения данных о ширине линии  $\Delta\nu = \Gamma/2\lambda$  или о прямо связанном с ней времени поперечной релаксации (дефазировки)  $T_2 = (\Delta\nu)^{-1}$ . В частотной спектроскопии спектральное разложение тем выше, чем больше отношение  $\Delta\nu/\Delta\nu_L$ , где  $\Delta\nu_L$  — ширина линии используемого лазерного излучения. Аналогичным параметром в нестационарной

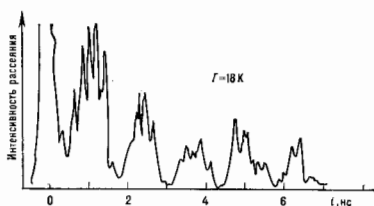


Рис. 7. Экспериментальные данные нестационарной КАРС-спектроскопии кристалла кварца, полученные при длительности импульса  $\tau_p$ , меньшей периода молекулярных колебаний  $T_m$ .

нарной спектроскопии является отношение времени дефазировки  $T_2$  к длительности возбуждающих и зондирующих импульсов  $\tau_p$ : должно выполняться условие  $T_2/\tau_p \gg 1$ . Если для возбуждения и зондирования во времени спектроскопии используются фемтосекундные световые импульсы, то (поскольку  $\omega_s/\Omega \gg 1$ ) возможны ситуации, когда длительности пробных импульсов оказываются малыми не только по сравнению с временами релаксации энергии и фазы, но и по сравнению с  $T_m = 2\pi/\Omega$  — периодом молекулярных колебаний. В этом случае появляется возможность регистрировать не только огибающую, но и саму форму молекулярных колебаний (рис. 7); нелинейный спектрометр становится стробоскопич. «оптическим осциллографом».

Регистрация нелинейного отклика используется для нелинейнооптической диагностики кристаллит. структуры приповерхностных слоев сильно поглощающих монокристаллов полупроводников и металлов (особенно диагностики с пико- и субпикосекундным временным разрешением). Совр. эксперим. техника позволяет легко регистрировать квадратичные и кубичные по полю эффекты в отраженном от кристалла свете, нелинейные взаимодействия в тонких приповерхностных слоях.

Нелинейное отражение от кристалла кремния (рис. 8) можно использовать для диагностики нарушения кристаллит. структуры, возникающих при ионной имплантации. В основе техники регистрации лежит анизотропия нелинейного отклика (линейный отклик Si — изотропен). Из рис. 8(б) видно, что увеличение дозы имплантации уменьшает анизотропию в угл. распределении интенсивности квадратичной 2-й гармоники (дипольная 2-я гармоника в Si запрещена); уменьшение анизотропии удается непосредственно связать с мерой аморфизации кристалла.

Рис. 8. Нелинейнооптическая диагностика поверхности монокристалла Si: а — интенсивность 2-й гармоники, отраженной от совершенного кристалла в зависимости от угла поворота  $\theta$ ; б, в — то же в вытравленном Si при разных дозах имплантации  $D=1, 2 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$  (б),  $2, 4 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$  (в).

Сильная анизотропия проявляется и в нелинейном отклике монокристаллов металлов — в Au, Cu, Al; зарегистрирован нелинейный отклик от пленок, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью. Все это стимулирует применение нелинейных оптич. методов к анализу динамики электронной структуры нормальных и сверхпроводящих металлов. Чувствительность нелинейного отклика к тонким деталям зонной структуры полупроводников и металлов делает нелинейнооптич. диагностику эфф. методом изучения не только симметрии потенциала, в к-ром движется электрон, но и деталей картины этого движения.

### 6. Параметрические процессы в параметрические преобразователи

Интенсивная световая волна — волна «накачки»  $E_H = \epsilon_H A_0 \exp(i\omega_H t - k_H r)$ , распространяющаяся в среде с быстрым нелинейным откликом, модулирует её диэлектрич. проницаемость  $\epsilon$  по закону бегущей волны. Бегущая волна диэлектрич. проницаемости способна усиливать слабые волны с соответствующим образом подобранными частотами и волновыми векторами — эффект, имеющий ряд общих черт с параметрич. усилением и параметрич. генерацией в системах с сосредоточенными параметрами.

В квадратичной среде диэлектрич. проницаемость

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1 \cos(\omega_H t - k_H r), \quad (32)$$

где  $\epsilon_1$  — коэф. модуляции диэлектрич. проницаемости,  $\omega_H = \omega_1 + \omega_2$  — частота накачки, равная сумме частот параметрически усиливаемых волн.

Поведение комплексных амплитуд волн, участвующих в таком трёхчастотном (трёхфотонном) параметрич. процессе (без учёта потерь), описывается системой трёх ур-ний [р. (22)]:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{u_1} \frac{\partial A_1}{\partial t} = -i\beta_{11} A_1 A_2^* e^{i\Delta z}, \quad (33a)$$

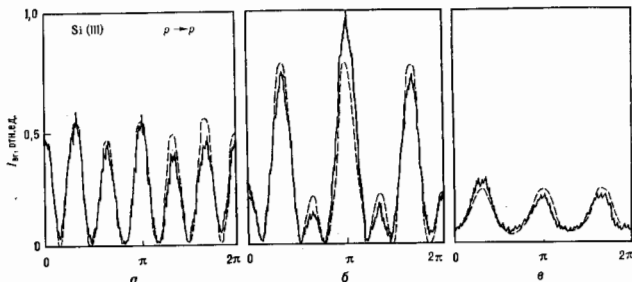
$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{u_2} \frac{\partial A_2}{\partial t} = -i\beta_{21} A_1 A_2^* e^{i\Delta z}, \quad (33b)$$

$$\frac{\partial A_H}{\partial z} + \frac{1}{u_H} \frac{\partial A_H}{\partial t} = -i\beta_{H1} A_1 A_2 e^{-i\Delta z}. \quad (33в)$$

Если  $u_1 = u_2 = u_H$ ,  $\Delta z = 0$  (выполняются условия фазового синхронизма  $k_H = k_1 + k_2$ ) и  $A_1, A_2 \ll A_H$  (последнее приближение обычно наз. приближением заданного поля накачки), то решения ур-ний (33a) и (33б)

$$A_1, A_2 \sim \exp g z; \quad g = \sqrt{\beta_{12}^2 |A_H|^2},$$

т. е. волны на частотах  $\omega_1, \omega_2$  экспоненциально усиливаются. Растройка фазовых скоростей ( $\Delta \neq 0$ ), обусловленная дисперсией среды, снижает инкремент:  $g = \sqrt{\beta_{12}^2 |A_H|^2 - \Delta^2}$ . Однако увеличением интенсив-



ности накачки в определ. мере можно компенсировать эффекты расфокусировки.

Для немодулиров. волн при  $\Delta = 0$ ,  $u_1 = u_2 = u_n$  система (33а) — (33в) допускает точное решение в эллипич. ф-циях. Графики решений представлены на рис. 9; интенсивности нормированы на интенсивность сигнальной волны на частоте  $\omega_1$ . Пространственные

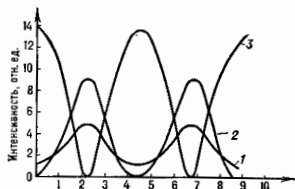


Рис. 9. Динамика изменения интенсивности волн при параметрическом взаимодействии в среде с квадратичной нелинейностью. По оси абсцисс — приведенная длина нелинейной среды; по оси ординат — интенсивности (в относительных единицах) волн сигнала  $I_1/I_{10}$  (1), разностной частоты  $I_2/I_{10}$  (2) и накачки  $I_3/I_{10}$  (3).

бвены трёх волн, изображённые на рис., представляют по существу периодич. последовательность процессов параметрич. усиления в поле мощной волны накачки  $\omega_n \rightarrow \omega_1 + \omega_2$  и сложения частот  $\omega_1 + \omega_2 \rightarrow \omega_n$ . В кубичной среде диэлектрич. проницаемость изменяется с удвоенной частотой накачки. Коэф. модуляции диэлектрич. проницаемости  $\epsilon_1 \sim \chi^{(3)} A_n^2$ . Частота накачки связана с частотами усиливаемых волн в этом случае соотношением

$$2\omega_n = \omega_1 + \omega_2 \quad (34a)$$

(четырёхчастотный — четырёхфотонный параметрич. процесс), и накапливающиеся взаимодействия имеют место, если

$$2k_n = k_1 + k_2. \quad (34b)$$

Экспоненциальное усиление волн на частотах  $\omega_1, \omega_2$  происходит в этом случае с инкрементом  $g = \sqrt{|\beta_1 \beta_2 A_n^2|}$ , где  $\beta_i \sim \chi^{(3)}$ .

Трёх- и четырёхчастотные параметрич. взаимодействия играют фундам. роль в Н. о. Трёхчастотное параметрич. усиление лежит в основе принципа действия перестраиваемых параметрических генераторов света: при фиксиров. частоте накачки  $\omega_n$  частоты усиливаемых волн  $\omega_1$  и  $\omega_2$  можно перестраивать, изменяя дисперсионные свойства среды.

Параметрич. генератор на основе кристалла ВВО (табл.) плавно перестраивается во всём видимом и ближнем ИК-диапазоне. Четырёхчастотные параметрич. взаимодействия также могут быть положены в основу разработки нелинейноэфф. преобразователей. Вместе с тем здесь следует подчеркнуть обстоятельство более принципиального порядка. В соответствии с (34а) и (34б) частоты взаимодействующих волн могут быть весьма близки: вырожденный режим четырёхчастотного взаимодействия соответствует  $\omega_n = \omega_1 = \omega_2$ ; однако волны могут различаться направлениями распространения, поляризациями. Благодаря этому для них легко реализуются крупномасштабные продольные и поперечные взаимодействия. В результате именно эффективные четырёхчастотные взаимодействия волн с близкими частотами определяют основные черты поведения мощного светового пучка в нелинейной среде — разнообразные неустойчивости, преобразования формы пространственной и временной модуляции и т. п.

## 7. Нелинейная динамика модулированных световых волн в кубичной среде

В среде с кубичной нелинейностью наиб. интерес представляют эффекты самовоздействия световых пакетов и пучков, обусловленные четырёхволновыми взаимодействиями разл. компонент их частотного и угл. спектров. Разнообразие механизмов нелинейности показателя преломления и возможность эфф. управления пространственными масштабами продольных  $L_1$  и поперечных  $L_2$  взаимодействий (варьируя ширину спектра, интенсивность светового поля, удаётся, в отличие от квадратичных сред, изменить соотношение между нелинейностью и дисперсией) позволяют реализовать в кубичной среде разнообразнейшие эффекты нелинейной волновой динамики. В основе их лежит сравнительно небольшое число фундаментальных нелинейных эффектов. Анализ их проводят в терминах преобразования пространственно-временных обтекающих; при физ. интерпретации используют и спектральные представления.

Самомодуляция, самосжатие и самофокусировка. В среде с вещественным нелинейным показателем преломления волновые пакеты и пучки испытывают фазовую самомодуляцию, к-рая за счёт дисперсии и рефракции сильно изменяет форму временной или пространственной модуляции обтекающей. Для волнового пакета вида

$$E(t, z) = A(t, z) \exp(i\omega_0 t - kz),$$

распространяющегося в среде с нелинейным показателем преломления (17), полное изменение фазы

$$\Phi = kz = \frac{\omega_0}{c} (n_0 + n_2 I) z = k_0 n_0 z + k_0 n_2 I(t) z, \quad (35a)$$

т. е. возникает зависящая от интенсивности добавка к фазе  $\Phi_{nl}(t) = -k_0 n_2 I(t) z$ , а следовательно, и частотная модуляция

$$\Delta\omega_{nl} = \frac{\partial \Phi_{nl}}{\partial t} = -k_0 n_2 \frac{\partial I}{\partial t} z. \quad (35b)$$

В результате частотный спектр пакета сильно уширяется. При  $n_2 > 0$  частота увеличивается от фронта импульса к хвосту. В среде с нормальной дисперсией групповой скорости это приводит, очевидно, к более быстрому распылению пакета, чем в линейной среде. Если дисперсия аномальная, спектральные ВЧ-компоненты, группирующиеся на хвосте импульса, догоняют НЧ-компоненты, располагающиеся на фронте; при этом частотно-модулиров. импульс сжимается — возникает самосжатие, «самофокусировка во времени». Во многом аналогичные явления возникают и при распространении волновых пучков. Рис. 10 иллюстрирует картину распространения волнового пучка в среде с  $n_2 > 0$ . Колоколообразное распределение обтекающей приводит к фазовой самомодуляции в пространстве; в рассматриваемом случае  $n_2 > 0$  она приводит к нелинейной рефракции и са-

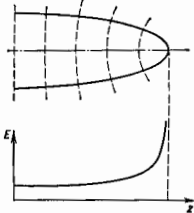


Рис. 10. Изменения профиля светового пучка в кубичной среде с  $n_2 > 0$ , обусловленные пространственной фазовой самомодуляцией. Штриховые линии — изменившаяся форма фазового фронта. Внизу — нарастание напряженности светового поля на оси пучка.

мофокусирует пучка, т. к. фазовая скорость света в центре пучка  $v_{ph} = c/(n_0 + n_2 I)$  меньше, чем на периферии. Следует подчеркнуть, что, в отличие от «линейной» фокусировки света с помощью линзы, самофокусировка носит «ламинарный» характер, характер неустой-

чивости. Действительно, вызванная фазовой самоудушлией поперечная неоднородность поля усиливает величину рефракции и т. д. Самосжатие, самофокусировку можно интерпретировать и на спектральном языке как результат последовательных четырёхволновых взаимодействий, приводящих к «лавиному» уширению частотного или углового спектров.

**Оптические солитоны.** Чем определяется предельное нелинейное сжатие светового импульса и светового пучка? При самосжатии плоских волновых пакетов, обусловленном продольными взаимодействиями, компрессия сдерживается дисперсионным расщеплением. При этом оказывается возможным устойчивый баланс

Рис. 11. Изменение формы импульсов с расстоянием, пройденным в нелинейной среде: а — при  $W < W_{кр}$  — расщепление; б — при  $W = W_{кр}$  — оптический солитон; в — при  $W > W_{кр}$  — компрессия.



сжатия и расщепления; он достигается при плотности энергии пакета (Дж/см<sup>2</sup>)

$$W_{кр} = 2 \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} / |k_{\omega^2} \tau_c| \quad (36)$$

При  $W = W_{кр}$  в кубичной среде распространяется стационарный импульс — солитон оптический, обгибающая  $k$ -рого

$$\rho_c(\eta) = \rho_{с0} \operatorname{sech}(\eta/\tau_c) \quad (37)$$

Такой импульс является стационарным решением нелинейного параболич. ур-ния типа (21)

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{1}{2} \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i \frac{1}{2} k_{\omega^2} |A|^2 A = 0 \quad (38)$$

Изменение формы световых импульсов при разл. соотношениях между  $W$  и  $W_{кр}$  изображено на рис. 11. Существенным оказывается то, что солитонное решение вида (37) оказывается устойчивым по отношению к малым вариациям  $W$  вблизи  $W_{кр}$ .

Нелинейная рефракция, приводящая к пространственной самофокусировке света, сдерживается дифракцией. Баланс нелинейной рефракции и дифракции достигается при полной мощности трёхмерного пучка

$$P_{кр} = \frac{(1,22\lambda)^2 c}{128 n_2} \quad (39)$$

[ср. с (36)]. Для волнового пакета и двумерного пучка баланс определяется интенсивностью, для трёхмерного — полной мощностью. Однако здесь баланс неустойчив; при  $P > P_{кр}$  нелинейная рефракция подавляет дифракцию, пучок продолжает сжиматься. Предельном этого «лавиного» процесса часто становится оптический пробой (см. также *Самофокусировка света*).

**Оптическая бистабильность.** Эффективность продольных взаимодействий может быть резко усилена за счёт использования обратной связи, оптич. резонатора. Ярким примером такого усиления является возникновение амплитудной оптич. бистабильности в оптич. резонаторе Фабри — Перо, заполненном средой с кубичной нелинейностью. За счёт многократного прохождения через среду сигнал на выходе приобретает значительный нелинейный фазовый набег. При достаточной большой интенсивности на входе интенсивность на выходе испытывает скачки и обнаруживает гистерезис (подробнее см. *Оптическая бистабильность*).

Генерация пространственных структур, оптическая турбулентность. Обусловленные продольными взаимодействиями оптич. бистабильность и соответствующие неустойчивости являются лишь «временными» проекциями широкого класса волновых взаимодействий, про-

исходящих одновременно в пространстве и времени. Принципиальную роль здесь играют поперечные взаимодействия,  $k$ -рые в свободном распространяющемся пучке и в традиц. схемах оптич. резонаторов имеют характер диффузии и оказываются мелкомасштабными. Пространственным масштабам и топологией поперечных взаимодействий можно управлять в системах с двумерной обратной связью (рис. 12). В цепь обратной связи

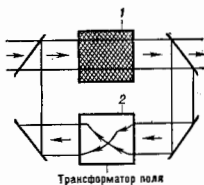


Рис. 12. Оптический резонатор с двумерной обратной связью: 1 — ислейная среда; 2 — трансформатор поля.

поместить сред с нелинейным показателем преломления, гистерезис и бистабильность возникают не только во времени, но и в пространстве. Нелинейная динамика поля в резонаторе с двумерной обратной связью описывается ур-нием для нелинейного фазового набег  $\varphi(r, t)$ :

$$\tau_{пл} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi(r, t) = D \Delta_1 \varphi(r, t) + K(1 + \theta \cos \varphi(r', t)) \quad (40)$$

где  $K = \eta k_{\omega^2} I_{вх} l$  — «управляющий параметр»,  $l$  — длина нелинейной среды,  $\eta$  — параметр потерь,  $\theta$  — видность интерференц. картины. Поперечные взаимодействия описываются правой частью (40), первый член характеризует мелкомасштабные взаимодействия; крупномасштабным взаимодействиям обязан сдвиг аргумента  $\cos$ ,  $r' \neq r$  (на парабол. ур-ние со сдвинутым аргументом). На рис. 13 приведены фотографии набег. типичных нелинейных структур: вращающихся волн (оптич. ревербераторов); спиральных волн, возникающих при больших значениях параметра  $K$ ; случайных

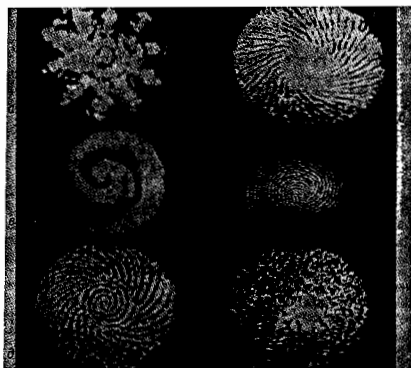


Рис. 13. Нелинейные структуры в резонаторе с двумерной обратной связью: а, б — вращающиеся волны; в, г — спиральные волны (случаю в соответствует меньший коэффициент диффузии); д — существование вращающейся и спиральной структур; е — оптическая турбулентность.

велинейных полей — оптич. турбулентности. Т. о., в Н. о. воспроизводится полный набор явлений велинейной волновой динамики, интесивно исследуемых в гидродинамике, физике плазмы; биологии и т. д. (см. также *Волны*).

**8. Рассеяние на оптически индуцированных когерентных элементарных возбудениях — вынужденное рассеяние**

Важным классом велинейных оптич. эффектов являются процессы вынужденного рассеяния (ВР), в к-рых мощная световая волна индуцирует когерентные элементарные возбудения в среде (оптич. и акустич. фононы, солитоны, температурные волны и т. п.) и когерентно рассеивается на них. Каждому виду спонтанного рассеяния света соответствует вынужденный аналог (см. *Вынужденное рассеяние света, Комбинационное рассеяние света*).

Вынужденное комбинац. рассеяние (ВКР) происходит на когерентно возбуждённых оптич. фононах. Для классич. описания процесса ВКР используем модель велинейно связанных осцилляторов. Обозначим через  $x$  нормальную координату колебаний атома в молекуле изотропной среды, а через  $y$  — нормальную координату колебаний «оптических» электронов. В линейном приближении колебания атомов и определяющие поляризации среды колебания электронов совершаются независимо друг от друга. При учёте велинейной связи потенц. энергию молекулы можно представить в виде

$$U = \frac{1}{2} Fx^2 + \frac{1}{2} fy^2 + \alpha xy^2, \quad (41)$$

где  $F$  и  $f$  — «упругости» связей в молекуле. Член  $\alpha xy^2$  описывает взаимодействие электронных и колебательных возмущений в молекуле (электрон-фононные взаимодействия). С учётом этого члена ур-ния движения для  $x$  и  $y$  приобретают вид [ср. с простой моделью ангармонич. осциллятора (4)]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \delta_1 \dot{x} + \Omega^2 x &= -\frac{\alpha}{M} y^2, \\ \ddot{y} + \delta_2 \dot{y} + \omega_0^2 y &= eE - \frac{2\alpha}{m} xy. \end{aligned} \quad (42)$$

Здесь  $M$  и  $m$  — приведённые массы атомного и электронного осцилляторов,  $\Omega$  — частота молекулярных колебаний,  $e$  — заряд электрона,  $E$  — электрич. поле световых волн. Если на систему, описываемую (42), действует биармонич. поле (13) с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , то при  $\omega_1 - \omega_2 \approx \Omega$  будет происходить резонансная раскваша молекулярных колебаний. Этот процесс используется в когерентной антистоксовой спектроскопии (см. раздел 5) [систему (42) можно рассматривать как классич. обоснование феноменологич. ур-ния (27)]. Теперь, однако, гл. акцент делается на обусловленном комбинац. резонансом энергообмене волн с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Энергия ВЧ-волны накачки  $\omega_1 \equiv \omega_N$  передается низкочастотной, стоксовой  $\omega_2 \equiv \omega_C$  волне; при достаточно большой интенсивности накачки  $I_N$  стоксова волна нарастает экспоненциально — возникает вынужденное комбинац. рассеяние

$$I_C = I_{\infty} \exp g I_N n_c, \quad (43)$$

где  $z$  — длина нелинейной среды,  $g$  — удельный коэф. усиления:

$$g \sim Na^2/n_n n_c \quad (44)$$

( $N$  — число молекул в единице объёма,  $n_n$  и  $n_c$  — показатели преломления среды на частотах накачки и стоксовой компоненты). Типичное значение  $g$  для наиб. важных комбинационно-активных сред (жидкий водород, жидкий азот, кристалл кальцита и др.) составляет  $10^{-2} - 10^{-3}$  см/Вт.

Вынужденное рассеяние используется для управления параметрами лазерного излучения: преобразования частоты, длительности, когерентности. Напр., *комбинационные лазеры* на сжатом водороде и жидком азоте осуществляют ВКР-преобразование лазерного излучения с квантовой эффективностью до 90%. При ВР возможна афф. компрессия лазерных импульсов с одноврем. повышением их пиковой мощности. Практически таким способом удаётся сжимать импульсы в 10–20 раз.

Процесс ВР используется для *обращения волнового фронта*. При ВКР энергия частично когерентного лазерного излучения преобразуется в энергию полностью когерентного светового пучка на сменяющей (стоксовой) частоте (ВКР-коррекция волнового фронта). Такая коррекция позволяет значительно ( $\sim 10^2$  раз) уменьшить угл. расходимость излучения. При этом квантовая эффективность преобразования составляет обычно 30–50%, а иногда и 80–90%.

**9. Статистическая нелинейная оптика. Классические и квантовые сжатые состояния световых полей**

Нелинейные преобразования корней образом изменяют статистику поля. Это хорошо известно в статистич. радиотехнике и в полной мере проявляется в оптике. Статистич. свойства сформированного в установившемся режиме лазерного излучения радикально отличаются от свойств гауссовского теплового излучения. С существ. изменением статистики приходится сталкиваться при генерации оптич. гармоник и комбинац. частот, в разнообразных самовоздействиях. Многие на перечисленных эффектах имеют по существу классич. природу, квантовый характер света в них не проявляется. Тем больший интерес представляет формирование с помощью нелинейных преобразований новых квантовых состояний светового поля, новых макроскопич. квантовых состояний. Наиб. яркий пример — генерация т. н. сжатых состояний поля, возникающая при параметрич. взаимодействиях. В 60-х гг. они были исследованы для классич. полей, в 80-х гг. выяснено, что они могут реализоваться и для квантовых полей. При этом возникают нетривиальные возможности управления квантовыми флуктуациями светового поля.

Классические сжатые состояния. Рассмотрим преобразование классич. шумового поля вырожденным оптич. параметрич. усилителем ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega_N/2$ ). В приближении заданного поля монохроматич. накачки и  $\Delta = 0$  поведение фазы сигнала волны  $\varphi = \arg A_0$  подчиняется ур-нию

$$\frac{\partial \varphi(t, z)}{\partial z} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \varphi(t, z)}{\partial t} + \beta \rho_N \sin 2\varphi = 0, \quad (45)$$

фаза волны накачки  $\varphi_N$  принята равной  $\pi/2$  [(45) можно получить из (33), полагая  $A_1 = A_2 = A_C = \rho_C e^{i\varphi}$ ]. Согласно (45):

$$\varphi(t, z) = \text{arctg} \left\{ \exp \left( -2\beta \rho_N z \right) \cdot \text{tg} \varphi_0(t - z/\alpha) \right\}$$

[ $\varphi_0(t)$  — значение фазы на входе нелинейной среды], из чего следует, что на достаточно больших длинах  $z$  возможны два устойчивых состояния фазы, равных 0 и  $\pi$ . Если сигнальная волна представляет собой стационарный гауссов шум, то на входе параметрического усилителя  $\varphi(\varphi) = 1/2\pi$ ;  $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ . По мере параметрич. усиления  $\varphi$ -функция распределения фазы трансформируется (рис. 14, а; кривые 1 и 2). Максимумы плотности вероятности фазы формируются вблизи устойчивых значений (0 и  $\pm\pi$ ). Дисперсия флуктуаций уменьшается — формируются классич. сжатые состояния поля.

Формирование сжатых состояний можно рассмотреть и в терминах поведения квадратурных компонент  $x(t, z)$  и  $y(t, z)$  сигнала:

$$x = (A_C + A_C^*)/2, \quad y = (A_C - A_C^*)/2i. \quad (46)$$

Тогда в соответствии с (33) эволюция квадратур  $x$ ,  $y$  даётся соотношениями

$$x(t, z) = x_0(t - z/u) \exp(\beta \rho_{II} z),$$

$$y(t, z) = y_0(t - z/u) \exp(-\beta \rho_{II} z).$$

т. е. усиливается синфазная квадратура  $x$ , а противофазная  $y$  — подавляется. Для стационарного гауссова шума с дисперсией  $\sigma^2$  дисперсии квадратур изменяются как

$$\langle \Delta x^2 \rangle = \sigma^2 \exp(2\beta \rho_{II} z), \quad \langle \Delta y^2 \rangle = \sigma^2 \exp(-2\beta \rho_{II} z),$$

т. е. флуктуации квадратурных компонент при параметрич. усилении сигнала становятся неодинаковыми (рис. 14, б).

Аналогично ведут себя при параметрич. усилении квантовые вакуумные флуктуации в поле итениввой классич. накачки. В квантовом скжатом состоянии вакуумные флуктуации одной из квадратурных компонент оказываются подавленными, а флуктуации другой увеличиваются. Естественно, при этом должно удовлет-

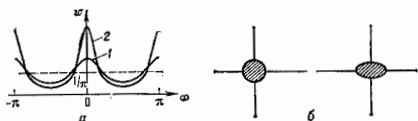


Рис. 14. Классический шумовой сигнал при параметрическом усилении: а — плотность вероятности распределения фазы обычного стационарного шума (штриховая линия) и шума при скжатом состоянии (кривые 1 и 2, для 2 коэф. усиления больше); б — области флуктуаций на фазовой плоскости обычного (слева) и скжатого (справа) шума.

воряться соотношение неопределённости. Если при измерении система реагирует лишь на одну квадратуру, шум фотодетектирования оказывается ниже уровня *дробового шума*. Подробнее см. *Сжатое состояние*.

### 10. Нелинейный отклик в физике воздействия лазерного излучения на вещество

Нелинейный отклик среды играет важную, а часто и решающую роль в механизмах лазерного возбуждения и релаксации сильнонеравновесных состояний в атомах, молекулах и конденсиров. средах. Первой яркой демонстрацией этого стало открытие и практич. использование селективного многофотонного возбуждения и многофотонной диссоциации молекул в сильном лазерном ИК-поле. Оказалось, что молекула может быть сильно возбуждена и затем диссоциирована при резонансном поглощении десятков фотонов из лазерного ИК-импульса интенсивностью  $\sim 10$  МВт/см<sup>2</sup> и плотностью энергии  $\sim$  виск. Дж/см<sup>2</sup> (см. *Инфракрасная многофотонная диссоциация*). Этот процесс сильно влияет на хим. реакции; будучи селективной по частоте, многофотонная диссоциация в ИК-поле может быть использована для лазерного *изотопов разделения*.

Др. важный пример — своеобразные нелинейные самовоздействия волн на поверхности металлов и полупроводников, приводящие к возникновению периодич. поверхностных структур (рис. 15). Возникают они самопроизвольно, когда интенсивность лазерного излучения оказывается достаточно высокой; это связано с пространственно неоднородным нагревом поверхности. Необходимое для этого неоднородное поле является результатом интерференции падающей лазерной волны с полем поверхностной волны. При этом важную роль играет появляющаяся обратная связь, когда образовавшиеся периодич. структуры существенно влияют на условия рассеяния лазерного излучения в дифракц. волны — возникает явления, имеющие много общего с вынужденным рассеянием. В разл. условиях могут возникать неустойчивости *поверхност-*

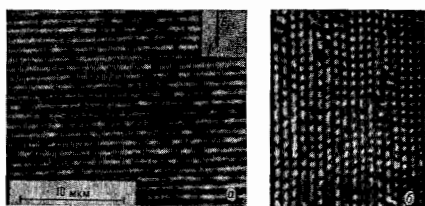


Рис. 15. Характерные периодические структуры, наводимые лазерным излучением на поверхности твёрдых тел: а — одномерная решётка на поверхности Ge, наводимая излучением неодомового лазера; б — двумерная решётка, возникающая на поверхности при увеличении интенсивности лазера.

ных акустических волн, капиллярных волн в расплавах и жидких металлах и интерференц. неустойчивости испарения поверхности. Создаваемый лазерным излучением рельеф может кардинально менять поглощат. и отражат. свойства поверхности: подавлять зеркальное отражение эл.-магн. волны, приводить к резкому возрастанию (до 100%) энерговода лазерного излучения в среду и т. п.

### 11. Быстрое управление фазой и генерация фемтосекундных лазерных импульсов

Нелинейные оптич. методы быстрого управления фазой и техника компрессии сверхкоротких импульсов (техника фокусировки во времени) сыграли важную роль в получении предельно коротких, фемтосекундных (длительностью  $\sim 10^{-15}$  с) световых импульсов. В основе методов лежит явление фазовой самомодуляции, приводящее к уширению спектра импульсов [см. фл.м (35а) и (35б)]. Для компрессии таких импульсов в случае  $n_2 > 0$  необходима среда с аномальной дисперсией групповой скорости: макс. коэф. сжатия импульса [см. (35б)]

$$S_{\text{макс}} = \tau_0 / \tau_{\text{мин}} \approx \left| \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right| n_2 I_0 L,$$

где  $\tau_{\text{мин}}$  — мин. длительность импульса при компрессии. В качестве сред с аномальной дисперсией могут быть использованы пары металлов (в области частот вблизи одnofотонного резонанса), устройства, состоящие из двух дифракц. решёток, некие типы интерферометров. Оптимальной нелинейной средой для получения фазовой самомодуляции оказываются одномерные волоконные световоды. Малость нелинейности (для кварцевого волокна  $n_2 = 3,2 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/кВт) с избытком компенсируется возможностью поддержания устойчивого поперечного профиля пучка диам. 5—10 мкм на расстояниях порядка длины поглощения  $l_p \approx \delta^{-1}$  (в видимом диапазоне  $l_p = 10^4-10^6$  см). Оптич. компрессор, состоящий из волновода с нормальной дисперсией и двух дифракц. решёток, позволяет получить  $S \approx 10^2$ . Существ. сжатия могут быть получены и при генерации оптич. солитонов.

### 12. Обработка информации в оптических компьютерах

Быстро развивающаяся область приложения методов Н. о. — разработка новых систем *оптической обработки информации*, создание оптич. цифровых и аналоговых процессоров.

В основу создания быстродействующих двоичных оптич. триггеров для цифрового оптич. процессора может быть положена амплитудная оптич. бистабильность. С практич. точки зрения наиб. впечатляющий прогресс в технологии амплитудных оптич. триггеров на полупроводниковых микрорезонаторах. На рис. 16 показана ячейка бистабильных оптич. микрорезонаторов на GaAs — AlAs-сверхрешётках. Логич. устрой-



Рис. 16. Члены оптических бистабильных микрорезонаторов GaAs — элемент процессора полностью оптического компьютера. Характерный размер  $\sim 2$  мкм.

ство «включ» на таких микрорезонаторах переключается с помощью светового импульса с энергией  $W_p \approx 2 \cdot 10^{-11}$  Дж. Характерное время переключения составляет  $\tau_p \approx 10^{-10}$  с. При дальнейшем совершенствовании технологии можно ожидать значений  $W_p \approx 2 \cdot 10^{-15}$  Дж (величина, в 30 раз превышающая флуантуп, предел) и  $\tau_p \approx 5 \cdot 10^{-14}$  с. Перспективы использования методов Н. о. и лазерной физики в технике оптич. компьютеров не исчерпываются амплитудными триггерами. Совр. Н. о. позволяет создавать быстрдействующие амплитудные, фазовые и поляризац. оптич. триггеры, оперирующие не только с дискретными сигналами, но и с волновыми структурами. Перспективно использование методов Н. о. для создания нейронно-сетевых компьютеров, предназначенных для решения нергулярных задач, распознавания образов, моделирования интеллекта. Здесь можно использовать системы обращения волнового фронта, матрицы нелинейных переключающих элементов в совокупности с голографич. преобразователями и анализаторами световых полей. Др. возможностью оптич. моделирования системы нейронно-сетевых элементов являются связи между собой, являющиеся развитием идеи двумерной обратной связи в кольцевом нелинейном резонаторе (рис. 12, 13). В таком резонаторе на смену обычной амплитудной оптич. бистабильности приходят новые нелинейные волновые явления, сопровождающиеся возникновением разнообразных пространственных структур, к-рые могут быть использованы в аналоговых процессорах, системах ассоциативной памяти (см. *Оптические компьютеры*).

Использование методов Н. о. расширяет возможности молекулярной электроники. Большие органич. молекулы обладают сильным кубич. откликом; особый интерес, с этой точки зрения, представляет отклик сильнодемокализов. электронов (рис. 5). Реакого доволнит. увеличения кубич. восприимчивости  $\chi^{(3)}$  (в  $10^4$ — $10^6$  раз) можно добиться, переводя молекулу в возбужденное электронное состояние. Это обстоятельство можно использовать для записи и считывания информации. Комбинирование методов Н. о. с методами молекулярной электроники может открыть совершенно неожиданные перспективы в разработке компьютеров новых поколений.

Лит.: Ахманов С. А., Хохлов Р. В., Проблемы нелинейной оптики, М., 1964; Влоберген Н., Нелинейная оптика, пер. с англ., М., 1966; Кляшук Д. К., Фотоника и нелинейная оптика, М., 1980; Ахманов С. А., Коростев Н. И., Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света, М., 1981; Райнхарт Дж., Нелинейные оптические параметрические процессы в жидкостях и газах, пер. с англ., М., 1987; Летохов В. С., Нелинейные селективные фотопроцессы в атомах и молекулах, М., 1983; Зеландо-

вич В. Я., Филиппенко Н. Ф., Шкунов В. В., Обращение волнового фронта, М., 1985; Ахманов С. А., Вислоух В. А., Чиркин А. С., Оптика фемтосекундных лазерных импульсов, М., 1988; Шен И. Р., Принципы нелинейной оптики, пер. с англ., М., 1980; Летохов В. С., Чеботарев В. П., Нелинейная лазерная спектроскопия, М., 1989; Гиббс Х., Оптическая бистабильность, управление светом с помощью света, пер. с англ., М., 1984; Новые физические принципы оптической обработки информации, под ред. С. А. Ахманова и М. А. Воронцова, М., 1990. С. А. Ахманов.

**НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ (НОА)** — поляризац. самовоздействие света большой интенсивности в среде, состоящее в простейшем случае в нелинейном (зависящем от интенсивности оптич. излучения) повороте плоскости поляризации линейно поляризов. света. НОА — нелинейный аналог явления естеств. оптической активности. Количеств. характеристика НОА — угол поворота плоскости поляризации света  $\phi$ , к-рый для данного вещества, как правило, пропорционален интенсивности света  $I$  и длине пути света в нелинейной среде  $L$ :  $\phi = C_{НОА} I L$  ( $C_{НОА}$  — уд. константа НОА, характеристика для данного вещества). Интенсивное световое (лазерное) поле может как изменить естеств. оптич. активность, так и индуцировать оптич. активность в негиротропных средах.

НОА может быть связана с лазерным нагревом оптически активной среды (тепловая НОА), с упорядочением ориентаций киральных (лево- и правосимметричных) молекул в растворах под действием электрич. поля световой волны, с обратной и необратимой деструкцией киральных структур в поле лазерного излучения. Особенный интерес для спектроскопии представляет исследование НОА, обусловленной электронными механизмами нелинейности, а именно неколлапсующей нелинейной откликом среды (НОА-I) и анизотропией нелинейного поглощения (НОА-II).

Микроскопич. модель НОА-I может быть построена на основе молекулярной модели Куна, по к-рой киральная молекула представляется в виде уругосвязанных ортогональных классич. нелинейных осцилляторов, разнесенных на конечное расстояние  $d$ . Гиротропная ансамбль таких молекул зависит от интенсивности света, причём угол  $\phi$  пропорционален параметрам нелинейности осцилляторов и расстоянию  $d$  между ними. В реальных средах в качестве  $d$  могут быть характерный размер молекулы, параметр кристаллич. решётки, борковский радиус экситона, шаг холестерич. или белковой спирали в растворах макромолекул.

НОА-II возникает в кристаллах, имеющих ось симметрии четвёртого порядка (в частности, в кубич. кристаллах), и является следствием поляризац. зависимости нелинейного поглощения.

НОА зависит от частоты и достигает макс. значений (резонанс) вблизи линейной и нелинейной полос поглощения. В резонансной области частот (длин волн  $\lambda$ ) оказывается существенным круговой дихроизм, зависящий от интенсивности света и приводящий к самоиндуциров. эллиптичности первоначально линейно поляризов. волны. Значения уд. константы НОА, обусловленной электронными механизмами нелинейности, изменяются в большом диапазоне, напр. для  $\text{LiIO}_3$   $C_{НОА} \sim 10^{-11}$  град-см-Вт $^{-1}$  ( $\lambda \sim 0,5$  мкм), для GaAs  $C_{НОА} \sim 10^{-6}$  град-см-Вт $^{-1}$  ( $\lambda \sim 0,9$  мкм).

Метод спектроскопии, развитый на основе эффекта НОА, даёт уникальную информацию о частотной дисперсии нелинейных оптич. восприимчивостей; о симметрии, о зонной структуре кристаллов, о свободных экситонах.

Лит.: Ахманов С. А., Жариков В. И., О нелинейной оптике гиротропных сред, сб. письма в ЖЭТФ, 1967, т. 6, с. 644; Келих С., Молекулярная нелинейная оптика, пер. с польск., М., 1981; Железудев Н. И., Петрико А. Д., Физические механизмы нелинейной оптической активности в кристаллах, Кристаллография, 1984, т. 29, с. 1045.

Н. И. Железудев.

**НЕЛИНЕЙНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ** среды — поляризация среды (появление объёмного дипольного электрич. момента), зависящая нелинейно от напряжённо-

сти мощного электрич. поля  $E$  эл.-магн. (в частности, световой) волны. Описывается вектором нелинейной поляризации  $P_{NL} = P - P_{линейн}$ . Такая зависимость проявляется при облучении среды интенсивными световыми (лазерными) пучками, в  $k$ -рых напряжённость электрич. поля сравнима с внутриатомными и внутримолекулярными полями. Н. п. является одним из видов нелинейного отклика вещества на действие эл.-магн. поля и может быть обусловлена разл. физ. механизмами: апармонизмом движения связанных электронов в веществе; ориентацией в сильном электрич. поле молекул, обладающих анизотропией *полярисемости*; локальным изменением плотности среды за счёт *электрострикции*; перераспределением частиц по энергетич. уровням при поглощении эл.-магн. излучения и т. д. Вид зависимости Н. п. от амплитуды электрич. поля световой волны в общем случае определяется конкретным механизмом нелинейности, величиной напряжённости поля  $E$  и характером её изменения во времени. Часто Н. п. представляют в виде разложения по степеням напряжённости  $E$  электрич. поля; в качестве коэф. ряда при этом выступают тензоры нелинейных восприимчивостей.

Нелинейной поляризацией объясняют возникновение таких эффектов, как генерация гармоник, смещение частот, самодействие и кроссвзаимодействие эл.-магн. волн, *вынужденное рассеяние света*, нелинейное поглощение, эл.-оптич. и магн.-оптич. эффекты и т. д. (подробнее см. *Нелинейные восприимчивости и Нелинейная оптика*).

К. В. Драбович

**НЕЛИНЕЙНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ** — совокупность методов оптич. спектроскопии, базирующихся на применении эффектов *нелинейной оптики*. Методами Н. с. исследуют нелинейные оптич. восприимчивости — их частотную дисперсию, симметричные свойства, изменения во времени и т. п., а также изменения линейных оптич. характеристик вещества (показателя преломления, коэф. поглощения, анизотропии и оптич. активности), вызванные нелинейным взаимодействием мощного оптич. (лазерного) излучения с исследуемым веществом. Н. с. относится к *лазерной спектроскопии*, т. к. для реализации всех методов Н. с. используются лазерное излучение одной или неск. длин волн. Одной из разновидностей Н. с. является *активная лазерная спектроскопия*. Первые работы по Н. с. появились в 1964—66, широкое развитие она получила после создания плавно перестраиваемых по частоте лазеров, а также лазеров со стабилизиров. узкими линиями генерации, лазеров, испускающих сверхкороткие световые импульсы с длительностью в пико- и фемтосекундном диапазонах, и др.

Исследования частотной и пространственной дисперсий нелинейных оптич. свойств — источник принципиально новой, ранее недоступной экзперим. исследованию информации о веществе. В Н. с. изучают также спектральные характеристики вещества, к-рые можно изучать и методами обычной линейной спектроскопии (положение и форму *контура спектральных линий*, сечения взаимодействий, поляризац. характеристики оптич. резонансов и т. п.), однако методы Н. с. часто обладают более высокой точностью, значительно более высоким отношением сигнала к шуму, большими спектральным, временным и пространственным разрешениями.

**Спектроскопия насыщения.** В этом методе монохроматич. лазерное излучение (излучение накачки) насыщает резонансную неоднородно уширенную спектральную линию поглощения (или излучения), а гораздо более слабый лазерный пучок, расширяющийся коллинеарно (сонаправленно либо навстречу) пучку накачки, зондирует индуциров. изменения в спектральном контуре линий (рис. 1). Мощное заколодосное лазерное излучение накачки вызывает перераспределение населённости уровней энергии системы. Наб. возмущению подвергается распределение населён-

стей уровнях энергии частиц, одна из резонансных частот  $\omega_0$  совпадает с частотой излучения накачки  $\omega_0$ . Неоднородно уширенная линия поглощения (испускания) квантовой системы влияния  $\omega_0$  насыщается. Если одновременно или с небольшой задержкой во времени зондирует систему менее интенсивным излучением (пробной волной) с перестраиваемой частотой  $\omega$ ,



Рис. 1. Схема квантовых переходов (а) и квантов «насыщения» линии поглощения для пробной волны (б) при спектроскопии насыщения поглощения. Сильное поле с частотой  $\omega_0$  насыщает переход 1—2 (неоднородно уширенный), а пробное поле малой интенсивности с перестраиваемой частотой  $\omega$  сканирует контур линии поглощения.

то в спектральном контуре поглощения (испускания) этой волны образуется «провал» на частоте  $\omega_0$ . Длительность существования провала определяется временем жизни частиц на возбужденном уровне. Перестройкой частоты пробного пучка удается измерить естествен. форму линии перехода, совпадающую с формой провала в «насыщенном» спектре поглощения (испускания) и обычно скрытую неоднородным (в газе — доплеровским) уширением. Этим методом можно также определить времена релаксации двухуровневой системы. Т. о., Н. с. позволяет измерять параметры одиночного оптич. резонанса, не поддающиеся измерению методами линейной спектроскопии. Циркулярно поляризованная волна накачки может индуцировать в среде *гиротропизм* для пробной световой волны.

**Спектроскопия выжигания провалов** применяется к спектроскопии насыщения. Она основана на селективном возбуждении монохроматич. лазерным излучением однородной группы атомов (молекул) примеси в охлаждаемой твердотельной матрице, к-рое самопроизводится фотохим. или иным превращением возбужденных частиц, кардинально изменяющим их спектры поглощения (испускания). В результате в неоднородно уширенном спектральном контуре поглощения (испускания) примесных частиц образуется узкий провал, к-рый обнаруживается при сканировании частоты слабоинтенсивного зондирующего излучения по полюсе поглощения (либо при изучении спектрального состава люминесценции) примесных частиц. Форма спектральной линии и ширина «выжженного» провала определяются однородной формой и шириной линии поглощения (испускания) отд. частицы. Время жизни спектрального провала может длиться от неск. микросекунд до многих часов, суток и быть ещё более продолжительным в зависимости от природы фотопроявления, испытуемого примесной частицей, и темп-ры образца. В предельном случае необратимого фотопроявления и полного исключения миграции невозбужденных частиц по матрице за счёт глубокого охлаждения образца спектральный провал может существовать неограниченно долго.

Т. о., метод позволяет исследовать тонкую структуру оптич. спектров примесных частиц, находящихся в неоднородном кристаллич. поле матрицы, и в обычных условиях скрытую под широким неоднородно уширенным контуром, и, следовательно, получать спектроскопич. информацию, недоступную линейным методам.

**Спектроскопия двух- и многофотонного поглощения.** В этом методе исследуемая пара уровней квантовой системы (атома, молекулы) возбуждается перекрывающимися сонравленными (или встречными) двумя или неск. лазерными пучками, причём сумма частот возбуждения ( $\omega_1 + \omega_2$  или  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3$ ) должна совпадать с частотой перехода 1—2. Происходит одноврем. поглощение двух (или неск.) фотонов из лазерных пучков, сопровождаемое квантовым переходом 1—2 (рис. 2). О возбуж-

дении системы судят либо по уменьшению интенсивности одного (обоих, неск.) пучка накачки на выходе из исследуемой среды, либо по вторичным эффектам: люминесценции возбужденных атомов, локальному нагреву среды в области взаимодействия пучков за счёт безызлучательного перехода энергии электронного возбуждения атома в колебат. и поступат. энергию, генерации акустич. колебаний при поглощении модуляров. излучения, изменению транспортного сечения атомов при возбуждении и т. п. При воздействии на газ из исследуемых частиц двух



Рис. 2. Спентроскопия двухфотонного поглощения. Кванты излучения с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  поглощаются одновременно.

встречных световых волн одинаковой частоты доплеровское уширение двухфотонного перехода полностью подавляется: доплеровские смещения частот поглощаемых атомом одинаковых фотонов, движущихся в противоположных направлениях, компенсируются; форма линии двухфотонного поглощения при сканировании частоты встречных волн совпадает с формой однородно уширенной линией одиночного атома; этот метод наз. бездоплеровской двухфотонной спектроскопией. Спентроскопия двухфотонного поглощения позволяет изучать разл. поляризац. эффекты, определяемые состоянием поляризации взаимодействующих волн и свойствами симметрии многофотонного перехода (см. *Многофотонное поглощение*).

Спентроскопия двойного резонанса реализуется при резонансном взаимодействии двух достаточно интенсивных монохроматич. световых полей с одной и той же квантовой системой (атомом, молекулой и т. п.; рис. 3). Резонансное лазерное излучение с частотой  $\omega_1$  изменяет распределение населённости энергетич. состояний поглощающей системы, а лазерное излучение с частотой  $\omega_2$  вызывает переходы между возбуждёнными (равне не заселёнными) состояниями кван-

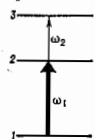


Рис. 3. Спентроскопия двойного резонанса. Сильное поле с частотой  $\omega_1$  возбуждает квантовую систему (переход 1—2), а слабое поле с частотой  $\omega_2$  регистрирует наличие резонансного поглощения на частоте перехода 2—3.

товой системы. При этом спектры поглощения из возбуждённого состояния оказываются свободными от доплеровского уширения. Возможна также Н. с. тройного и более высокой кратности резонанса. В отличие от спектроскопии двух- или многофотонного поглощения, в спектроскопии двойного резонанса происходит реальное заселение промежуточных энергетич. состояний исследуемой квантовой системы, так что возбуждение промежуточных уровней и их зондирование могут быть равнены во времени. В зависимости от того, в каком диапазоне длин волн лежат  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , наблюдаются двойные резонансы: в видимом диапазоне ( $\omega_1$  и  $\omega_2$  — в видимом диапазоне), ИК — видимый, УФ — видимый, ИК — ИК, ИК — СВЧ, ИК — УФ и т. п. Переходы из возбуждённых состояний в более высоколежащие можно зондировать не только по поглощению, но и изучать по вторичным эффектам: люминесценции из высоко возбуждённого состояния (уровень 3 на рис. 3); доплер. локальному нагреву среды, вызываемому поглощением фотонов с частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и последующей безызлучательной передачей энергии возбуждения в поступат. кинетич. энергию частиц; генерации акустич. колебаний при поглощении модуляров. световых волн и т. п. Возможна также регистрация спектров по схеме когерентной активной спектроскопии из возбуждённых состояний и по др. схемам четырёхволнового смешения (см. ниже).

Когерентная нелинейная спектроскопия нестационарных процессов включает спектроскопию *оптической нутации*, спектроскопию *затухания свободной поляризации* и оптич. эхо-спектроскопию. Эти виды Н. с. — аналоги нестационарных вариантов спектроскопии ядерного магн. резонанса. С их помощью получают информацию об удельных оптич. резонансах в обычных спектрах, либо скрытую неоднородным уширением спектральных линий, либо вовсе не проявляющуюся в линейных спектрах (рис. 4). Когерентные переходные процессы возникают при ступенчатом изменении

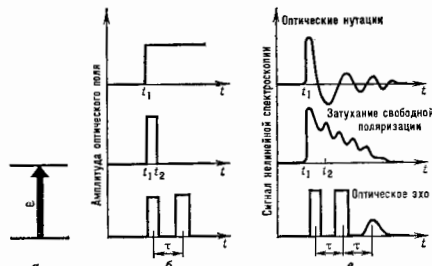


Рис. 4. Схемы когерентной нелинейной спектроскопии нестационарных процессов: а — двухуровневая система, с которой нестационарно взаимодействует резонансное оптическое поле; б — зависимости от времени амплитуды оптического поля в трёх различных схемах нелинейной когерентной спектроскопии: вверху — ступенчатое включение резонансного взаимодействия в момент времени  $t_1$ ; средняя диаграмма — импульсное резонансное воздействие оптического поля на двухуровневую систему ( $t_1$ ,  $t_2$  — моменты начала и конца оптического импульса); внизу — резонансное воздействие оптического поля на двухуровневую систему в виде двух последовательных коротких импульсов, разделённых интервалом  $\tau$ ; в — временные диаграммы сигнала в нелинейной спектроскопии, соответствующий амплитудам оптического поля на рис. б: вверху — сигнал оптических нутаций в амплитуде резонансной оптической волны, прошедшей сквозь образец; средняя кривая — сигнал затухания свободной поляризации излучения, прошедшего через образец; внизу — сигнал оптического эхо в виде импульса излучения спустя время  $\tau$  после воздействия второго импульса.

(включения, выключения) резонансного взаимодействия между оптич. излучением и исследуемой квантовой системой. Часто удобнее осуществлять быстрые «штарковское переключение» частоты перехода в атоме (молекуле) т. о., чтобы она вступила в резонанс с частотой оптич. поля. Изменение частоты перехода происходит в результате *Штарка эффекта*, возникающего при наложении ступенчатого электрич. поля, напряжённость которого перпендикулярна лазерному лучу; величина напряжённости поля выбирается такой, чтобы вызванный им штарковский сдвиг атомного (молекулярного) уровня компенсировал расстройку между частотами лазерного излучения и исследуемого перехода.

Оптич. нутации — затухающие осцилляции интенсивности излучения на выходе из исследуемой среды — возникают сразу после включения (выключения) резонансного взаимодействия волны с частицами среды. Для всех частиц, вступивших в резонанс с возбуждающим излучением, возникают синфазные колебания населённости возбуждённого уровня энергии, что и определяет осцилляции интенсивности излучения. Время затухания оптич. нутаций определяется временем жизни возбуждённого уровня энергии, а период нутаций — обратной величиной частоты Раби  $\Omega_R$  (в точном резонансе  $\Omega_R = d_{12} E/\hbar$ , где  $d_{12}$  — дипольный момент перехода 1 — 2,  $E$  — амплитуда электрич. поля резонансной эл.-магн. волны). Спентроскопия оптич. нутаций по-



звляет измерять время жизни возбуждённого уровня и дипольный момент перехода.

Затухание свободной поляризации наблюдается в виде излучения, испускаемого атомами (молекулами) среды после их возбуждения коротким импульсом резонансного излучения. Оптический импульс наводит в ансамбле частиц макроскопич. поляризацию (суммарный дипольный момент всех возбуждённых светом частиц), благодаря чему и после окончания импульса возбуждённые частицы продолжают испускать излучение частоты, резонансной частоте перехода. Вследствие дефазировки колебаний отд. диполей (в газе — вследствие поступат. движения частиц, т. е. доплеровской дефазировки) происходит затухание макроскопич. поляризации. Этот эффект наблюдается и при любом ступенчатом переключении резонансного оптич. излучения (обычно он происходит одновременно с оптич. втуациями в течение первого периода втуаций) и используется в спектроскопии высокого разрешения.

Простейший вариант оптич. эхо-спектроскопии (спектроскопия на основе светового эха) реализуется при наблюдении зависимости амплитуды сигнала светового эха от времени задержки эл.-магн. излучения, резонансно взаимодействующего с ансамблем частиц среды. Сигнал светового эха появляется после 2-го импульса через время, равное задержке 2-го импульса относительно 1-го. Оптич. эхо есть, по существу, повторное возникновение эффекта затухания свободной поляризации, к-рое сопровождается 1-й импульс. 2-й импульс нужен для того, чтобы восстановить одинаковую фазу возбуждённых 1-м импульсом атомных диполей, потерянную к моменту прихода 2-го импульса вследствие процессов релаксации. Для регистрации оптич. эха площадь 1-го импульса (интеграл от амплитуды напряжённости оптич. поля по всей длительности импульса, умноженный на дипольный момент перехода  $d_{12}$ ) должна быть равна  $\pi/2$ , второго —  $\pi$ . Спектроскопия светового эха — один из наиб. мощных инструментов изучения столкновительных релакс. процессов в газах. Время затухания сигнала светового эха равно эфф. времени жизни возбуждённого уровня, определяемого атомами (молекулярными) столкновениями и спонтанным излучением. Методами спектроскопии светового эха измеряют также сверхтонкую структуру возбуждённых состояний.

Помимо описанного метода двухимпульсного эха находят применение спектроскопия вынужденного (трёхимпульсного) эха и спектроскопия дуга эха типа Карра — Парселла.

Когерентная спектроскопия комбинационного рассеяния (стаационарная и нестационарная; см. *Активная лазерная спектроскопия*) позволяет измерять времена релаксации, изучать процессы внутри- и межатомного переноса энергии возбуждения для трёх- и более уровней систем (рис. 5).

Спектроскопия трёх- и четырёхволнового смешения — один из наиб. распространённых методов Н. с. — представляет собой варианты когерентной активной лазерной спектроскопии поглощения и (или) рассеяния света. В этих методах регистрируется частотная зависимость интенсивности (поляризации, фазы) световой волны, генерируемой в исследуемой среде за счёт трёх- или четырёхволнового смешения (с участием *наибольшей восприимчивости* 2-го и 3-го порядков соответственно), т. е. за счёт величайших оптич. процессов, при к-рых

$$\omega_c = \omega_1 \pm \omega_2 \quad (1)$$

или

$$\omega_c = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3, \quad (2)$$

где  $\omega_c$  — частота регистрируемой волны сигнала,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  — частоты лазерных волн накачки, вводимых в исследуемую среду кванте.

Частотная зависимость исследуемого параметра волны сигнала смешения испытывает резонансное измене-

ние, когда частота одной или неск. волн накачки либо к.-л. их линейная комбинация ( $\omega_1 \pm \omega_2$ ;  $\omega_1 \pm \omega_3$ ;  $\omega_2 \pm \omega_3$  и т. п.) совпадает с частотой соответствующего разрешённого правилами отбора перехода в исследуемой системе. Для получения сигнала достаточно большой интенсивности используют явление синхронной генерации сигнала смешения, когда одновременно с условиями (1) или (2) выполняются условия фазового синхронизма для волновых векторов  $k_c, k_1, k_2, k_3$  взаимодействующих волн:

$$k_c = k_1 \pm k_2 \quad (3)$$

либо

$$k_c = k_1 \pm k_2 \pm k_3, \quad (4)$$

В centrosимметричных средах, обладающих макроскопич. центром инверсии (газы, жидкости и плазма в отсутствие внеш. воздействий, стёкла, аморфные твёрдые тела, кристаллы опред. классов), квадратичные процессы при трёхволновом смешении запрещены. Поэтому наиб. универсальна спектроскопия четырёхволнового смешения. Она обладает высоким спектральным разрешением, определяемым только шир-

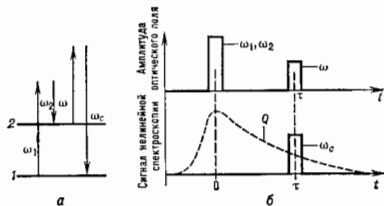


Рис. 5. Когерентная активная спектроскопия комбинационного рассеяния: а — квантовые переходы; б — временной ход процессов нестационарной когерентной спектроскопии комбинационного рассеяния. Сигнал с частотой  $\omega_c = \omega_1 + (\omega_2 - \omega_1)$  регистрируется спустя время задержки  $t$  (перемежное) после воздействия двух импульсов лазерной накачки (частоты  $\omega_1, \omega_2$ ) (внизу пунктиром показан временной ход амплитуды  $Q$  когерентных молекулярных колебаний, возбуждённых импульсами накачки).

нами спектральных линий с частотами  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ . Т. к. эти ширины могут быть сделаны предельно малыми, спектральная разрешающая способность  $G$  приборов, используемых в этом методе (типичные значения  $G = \omega/\Delta\omega \sim 10^8 - 10^{11}$ ), на несколько порядков выше, чем для традиц. *спектральных приборов* или фурье-спектрометров (для них  $G \sim 10^3 - 10^7$ ). При этом область дисперсии для нелинейных спектрометров может быть аномально велика, она определяется шириной области перестройки частоты одного или нескольких перестраиваемых лазеров накачки и может занимать значит. часть видимого спектра. При сочетании спектроскопии четырёхволнового смешения с Н. с. на смешении удаётся исключить доплеровское уширение. Пространств. разрешение методов смешения частот определяется размерами области перекрытия всех взаимодействующих пучков.

С помощью методов Н. с. смешения может быть достигнуто очень высокое временное разрешение. Для этого излучение накачки направляют в среду в виде коротких импульсов, синхронизованных с изучаемыми процессами с точностью, не меньшей, чем длительность используемых оптич. импульсов, и вводят переменную, строго контролируемая временная задержка между началом изучаемого процесса и моментом возбуждения. В таком случае временное разрешение схем регистрации определяется длительностью лазерных импульсов, к-рые могут выбираться в пико- и даже в фемтосекундном диапазоне (см. *Фемтосекундная*

спектроскопии). Максимально возможные значения спектрального, пространственного и временного разрешения достигаются в различных по конструкции и принципу действия спектрометрах.

Спектроскопия в *k*-пространстве представляет собой вариант спектроскопии четырёхволнового (реже — шестиволнового и т. п.) смещения в нецентросимметричных кристаллах. Он позволяет исследовать дисперсионные и резонанс. Характеристики разл. элементарных возмущений смешанной природы в кристаллич. твердых телах (поляритонов).

В нецентросимметричных кристаллах процесс четырёхволновой спектроскопии является интерференцией «яркого» (собственно эффекта четырёхволновой спектроскопии с участием кубич. нелинейной восприимчивости) и «каскадного» (два последоват. процесса трёхволновой спектроскопии с участием нелинейной восприимчивости 2-го порядка) процессов. Последний процесс идёт с генерацией на первом этапе ад.-магн. волны промежуточной частоты, нарз. разностной:  $\omega_p = \omega_1 - \omega_2$  (её волновой вектор  $k_p$  на рис. 6), а на втором — сигнальной волны путём смещения одной из



Рис. 6. Диаграмма волновых векторов в схеме синхронной каскадной генерации сигнала четырёхволнового смещения в нецентросимметричном кристалле: частота сигнала четырёхволновой спектроскопии  $\omega_p = \omega_1 - \omega_2$ ; оптическое поле промежуточной частоты  $\omega_p = \omega_1 - \omega_2$  попадает в область фононного поляритонного резонанса кристалла. Изменяя угол  $\theta$  между волновыми векторами волн накачки  $k_1, k_2$  при сохранении условия синхронизма внешнего процесса  $k_c = k_1 - k_2 + k_p$ , можно изменить  $k_p$  и соответственно величину волновой разстройки процесса генерации промежуточной частоты  $\Delta k_1 = q_0 - k_p$  [ $q_0 = \omega_p n(\omega_p) c / v(\omega_p)$  — волновой вектор поляритона с частотой  $\omega_p = \omega_1 - \omega_2$ ];  $n(\omega_p)$  — показатель преломления на соответствующей частоте], осуществляя тем самым спектроскопию в *k*-пространстве.

волн накачки с волной промежуточной частоты, нарз. в процессе суммирования частот:  $\omega_3 = \omega_2 + \omega_p$  (волновой вектор  $k_3$ ). При этом промежуточная частота сканирует область исследуемого поляритонного резонанса (нарз., разностная частота  $\omega_p$  сканирует область фононных поляритонных частот). Возможны случаи генерации волны промежуточной частоты на сумме частот накачки ( $\omega_p = \omega_1 + \omega_2$ ), к-рая может сканировать область экситонных поляритонных частот и т. п.

Амплитуда сигнальной волны чувствительна к изменению на каждом из этапов каскадного процесса условий фазового синхронизма (3). Следовательно, интенсивность  $I_c$  сигнала смещения (нарз., с частотой  $\omega_c = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3$ ) является ф-цией не только частот накачки  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  и их линейных комбинаций (нарз., разности частот  $\omega_p = \omega_1 - \omega_2$ ), но и волновых расстройек  $\Delta k_1, \Delta k_2$  каждого из этапов каскада, т. е. возможна Н. с. не только в пространстве частот  $\omega$ , но и в спектрокопии в пространстве волновых векторов. В приведённом примере расстройка  $\Delta k_1$  равна разности волнового вектора  $q_0$  собств. волны исследуемой среды на разностной частоте фононного поляритона и волнового вектора промежуточной волны  $k_p = k_1 - k_2$ , т. е.  $\Delta k_1 = q_0 - (k_1 - k_2)$ . Оставляя фиксированными все частоты  $\omega_1, \omega_2, \dots$  и их линейные комбинации и изменяя  $\Delta k_1$  (нарз., варьируя геометрию пересечения взаимодействующих волн), можно изучать «сценарии» в пространстве волновых векторов (*k*-пространстве). Этот метод Н. с. особенно удобен для исследования дисперсионных кривых собств. мод среды вблизи резонансов, т. е. поляритонных дисперсионных кривых разл. видов (фононных, плазмонных, экситонных, поляритонных мод и т. п.).

Опτικο-гальваническая спектроскопия использует резонансное одно- или многофононное поглощение в исследуемой двухуровневой системе, к-рое регистрирует-

ся по изменению предварительно пропускаемого через неё электрич. тока. С помощью этого метода изучают спектры газов (нарз., в электрич. разряде). Излучаемые лазерным излучением изменения электрич. тока вызываются изменениями сечения рассеяния электронов проводимости на резонансно возбуждённых атомах, проводящими, в свою очередь, к изменениям электрич. сопротивления (импеданса) разрядного промежутка. Методы оптико-гальванич. Н. с. также могут быть свободными от доплеровского уширения спектральных линий поглощения.

Работают и иногда применяются и др. методы Н. с. — поляризац. Н. с. (в т. ч. когерентная нелинейная *маллюметрия*), магн.-оптич. Н. с. (в т. ч. нелинейные аналоги спектроскопии пересечения уровней) и т. п.

Лит.: Летохов В. С., Чеботов В. П., Принципы нелинейной оптической спектроскопии, М., Изд. Нелинейная спектроскопия, под ред. Н. Бломбергена, пер. с англ., М., 1979; Ахманов С. А., Коротева Н. И., Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света, М., 1981; Дзерная и когерентная спектроскопия, пер. с англ., М., 1982; Голцов А. К., Введение в нелинейную спектроскопию, Новосибир., 1983; Параметрические генераторы света и пикосекундная спектроскопия, Вильнюс, 1983; Деметриев В. П., Лазерная спектроскопия: основные принципы и техники; Нелинейная пер. с англ., М., 1985.

Н. И. Коротева. НЕЛИНЕЙНАЯ СРЕДА — среда, отклик к-рой на действие внеш. возмущения нелинейно зависит от амплитуды возмущения. В Н. с. не выполняется *суперпозиции принцип*: отклик на сумму возмущений не равен сумме откликов на отд. возмущения. Свойства Н. с. под действием мощного излучения (акустич., ад.-магн.) меняются и зависят от амплитуды воздействия, поэтому и распространение волн в Н. с. определяется их амплитудой. В результате возбуждаются волны, отличающиеся от падающих частотами, направлением распространения и состоянием поляризации. Это приводит к таким эффектам, как генерация гармоник, сложение и вычитание частот, самовоздействие и кроссвзаимодействие, нелинейное отражение и т. д. Практически все среды при больших амплитудах падающих волн проявляют нелинейные свойства. В нелинейной оптике Н. е. широко используются для преобразования частоты и волновых фронтов световых волн. Подробнее см. *Волны, Нелинейная акустика, Нелинейная оптика, Нелинейные явления в плазме*.

К. Н. Дробинич. НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ — тензорные коэффициенты, связывающие нелинейную часть поляризации  $P = P_d + P_{нл}$  единичного объёма среды, возникающую под действием сильных электрических (в частности, световых) полей, с величинами напряжённостей этих полей [1,2,3]. Соответствующее соотношение, называемое материальным ур-нием, может быть записано в форме разложения по степеням напряжённости электрич. поля E:

$$P = P_d + P_{нл} = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}EE + \chi^{(3)}EEE + \chi^{(4)}EEEE + \dots \quad (1)$$

Материальное ур-ние нелинейной немагн. среды без пространств. дисперсия может быть представлено в виде

$$P(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P^{(n)}(t); \quad P^{(n)}(t) = \int_0^t \int_0^{\tau_1} \dots \int_0^{\tau_{n-1}} \chi^{(n)}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \dots E(t-\tau_1)E(t-\tau_2) \dots E(t-\tau_n); \quad (2)$$

$$(\chi^{(n)} \dots E_i E_j \dots E_n)_{ijk\dots jln} = \sum_{j_1, j_2, \dots, j_n} \chi^{(n)}_{j_1 j_2 \dots j_n} E_{j_1} E_{j_2} \dots E_{j_n}$$

Здесь тензор  $\chi^{(n)}$  ранга  $(n+1)$  — Н. в. *n*-го порядка, описывающая отклик среды на совокупность возмущений в разл. моменты времени  $t - \tau_1, t - \tau_2, \dots, t - \tau_n$ . (Это разложение — сходящееся, т. е. ряд можно ограничить нек. членами, т. к. память среды на возбуждение конечна вследствие процессов диссипации.)

Для описания задач нелинейной оптики и нелинейной спектроскопии, где используются когерентные лазерные источники возбуждения, нарз. важен аналог

соотношения (2), записанный в спектральном представлении для дискретного спектра возбуждения:

$$P_i(\omega) = \sum P^{(n)}(\omega);$$

$$P_i^{(n)}(\omega) = \sum_{j_1, j_2, \dots, j_n} \chi_{i j_1 j_2 \dots j_n}^{(n)}(\omega, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) E_{j_1}(\omega) \times E_{j_2}(\omega) \dots E_{j_n}(\omega_n), \quad (3)$$

где  $\omega = \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n$  — частота нелинейного отклика.

Будучи оптич. характеристиками среды, тензоры Н. в. должны обладать опредл. симметрией, отражающей структурную симметрию среды [4]. В соответствии с этим нек-рые тензорные элементы оказываются равными нулю, а другие связаны друг с другом, что уменьшает число независимых элементов компонент. Напр., тензор кубич. Н. в.  $\chi^{(3)}$ , в общем случае содержащий 81 компоненту, в изотропной среде имеет только три независимые компоненты. В средах с центром инверсии все Н. в. чётных порядков тождественно равны нулю. В средах без диссимации Н. в. любого порядка — действит. величина.

Действительная и мнимая части восприимчивости  $\chi^{(l)}$  описывают линейные оптич. эффекты (преломление и поглощение света). Н. в. 2-го порядка  $\chi^{(2)}$ , свойственная средам, не имеющим центра симметрии, описывает генерацию второй оптич. гармоники, оптич. выпрямление (см. *Детектирование света*) и др. процессы нелинейного смещения двух волн с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , приводящие к рождению излучения на суммарной или разностной частотах  $|\omega_1 \pm \omega_2|$ . Кубическая Н. в.  $\chi^{(3)}$ , отличная от нуля в средах с симметрией любого типа, описывает разл. процессы самовоздействия света — нелинейное поглощение, самофокусировку и дефокусировку, самоиндуциров. вращения эллипса поляризации. Кубической Н. в. объясняются также процессы, возникающие при взаимодействии трёх волн с разл. частотами  $\omega_1, \omega_2$  и  $\omega_3$ , приводящие к повлечению излучения на комбинац. частотах  $\omega = |\omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3|$ , напр. генерации третьей гармоники при вынужденном комбинац. рассеянии, вынужденном *Манделштама* — *Бриллюэна* рассеянии и т. д. Более высокий ранг тензора  $\chi^{(3)}$  по сравнению с тензором  $\chi^{(1)}$  проявляется в том, что кристаллы кубич. классов, изотропные с точки зрения своих линейных оптич. свойств, в нелинейной оптике анизотропны. Это приводит к поляризац. особенностям нелинейного поглощения, генерации третьей оптич. гармоники, к самоиндуциров. повороту плоскости поляризации линейно поляризованного света (см. *Нелинейная оптическая активность*).

Микромоделю Н. в. Наиб. универсальная причина нелинейных оптич. эффектов — нелинейный отклик атомарного или молекулярного осциллятора на световое воздействие.

В классич. модели среды как совокупности заряженных ангармонич. осцилляторов удаётся вычислить смещение заряда  $q$  на расстояние  $r_1$  от положения равновесия под действием электрич. поля световой волны. Поляризацию единицы объёма среды, содержащей  $N$  осцилляторов, можно представить в виде  $P = N \sum q_i r_i(E)$ . Движение осциллятора в поле световой волны описывается нелинейным ур-нием

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + 2\gamma \frac{dr}{dt} + \omega_0^2 r - \lambda r^2 - \eta r^3 = \frac{q}{m} E.$$

Если решение этого ур-ния ищут в виде ряда по степеням  $E$ , то поляризацию среды тоже записывается в виде ряда, а коэф. этого ряда являются Н. в. Из решения этого ур-ния следует, что гармонич. зл.-магн. волна индуцирует поляризацию в системе ангармонич.

осцилляторов на частотах  $\omega, 2\omega, 3\omega$  и т. д. Оптич. резонансы возникают не только при приближении частот действующих волн к собствен. частоте осциллятора  $\omega_0$ , но и при совпадении с ней тех или иных комбинац. частот, поэтому частотная дисперсия Н. в. имеет сложный вид. Напр., кубич. Н. в. даётся выражением

$$\chi^{(3)}(\omega, \omega_1, \omega_2, \omega_3) = N \frac{e^4}{m^3} \left[ \eta + \frac{4}{3} \lambda^2 F(\omega_1) F(\omega_2) + F(\omega_3 + \omega_3) + F(\omega_3 + \omega_1) \right] \times F(\omega_1) F(\omega_2) F(\omega_3) F(\omega);$$

где

$$F(\omega_n) = \left( \omega_0^2 - 2\gamma\omega_n - \omega_n^2 \right)^{-1}, \quad n = 1, 2, 3;$$

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3.$$

В поле монохроматич. излучения Н. в.  $\chi^{(3)}(3\omega, \omega)$ , ответственная за генерацию 3-й гармоники, испытывает резонанс при  $\omega = \omega_0, 2\omega = \omega_0$  и при  $3\omega = \omega_0$ .

Расчёт Н. в. производится также методами квантовой механики. Поляризацию  $P(r, t)$  связана с электрич. полем, действующим на систему, квантовомеханич. ур-ниями

$$P(r, t) = N \text{Sp}[\rho(r, t), p],$$

$$i\hbar \frac{\partial \rho}{\partial t} = [\mathcal{H}\rho] + i\hbar \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{\text{внутр}}$$

( $\rho$  — оператор матрицы плотности,  $p$  — оператор электрич. дипольного момента,  $\mathcal{H}$  — полный гамильтониан системы), причём восприимчивости  $n$ -го порядка можно рассчитывать, решая указанные ур-ния методом возмущений, т. е. представив  $\rho(r, t)$  в виде ряда по возрастающим степеням  $E$ . Т. о. удаётся получить Н. в. любого порядка для системы, состоящей из атомов. Однако детальное описание сложных молекулярных систем в большинстве случаев затруднительно. Ещё труднее рассчитывать Н. в. вблизи электронных переходов в сложных молекулах и конденсиров. средах. Напр., квантовомеханич. описание нелинейных оптич. свойств кристаллов требует детального знания зонной структуры; афф. масс носителей тока, симметрии зон, правил отбора, дисперсионных соотношений и т. д. Однако в большинстве практич. случаев частоты переходов и волновые ф-ции достаточно хорошо известны, поэтому для расчёта Н. в. используют разл. приближённые модели [5]. Напр., достаточную точность для расчёта Н. в. даёт модель связей, предполагающая, что индуцируемая в кристалле поляризация есть векторная сумма поляризации, наведённых на всех связях между атомами в единичном объёме, и что идентичные связи в разл. твёрдых телах имеют одинаковые свойства. Взаимодействие между связями не учитывается.

При расчёте Н. в. жидкостей и твёрдых тел необходимо также принимать во внимание фактор локального поля, учитывающий отличие приложенного к среде поля от поля, действующего на отд. молекулу.

Нелинейный отклик отд. атома или молекулы на электрич. поле световой волны — не единств. причина нелинейных оптич. эффектов. Н. в. могут иметь, напр., тепловую природу, когда поглощение света вызывает нагрев, а следовательно, изменение коэф. преломления вещества. К нелинейному изменению коэф. преломления может привести изменение плотности вещества из-за расширения, связанного с квадратичной *электрострикцией* в поле световой волны. В жидкостях и жидких кристаллах существенны нелинейности, обусловленные оптич. ориентацией анизотропных молекул в поле поляризов. лазерной волны. Электронные механизмы нелинейности удаётся отличить от тепловых, стрикционных, ориентационных по временам установления нелинейного отклика и его релаксации, к-рые для электр. процессов, как правило, меньше.

В ряде случаев, как и в линейной оптике, необходимо учитывать влияние на нелинейную поляризацию в выбранной точке среды полей в разл. других точках (нелокальные нелинейноопт. явления). Относит. вклад нелокальных нелинейных процессов в поляризацию  $P$  среды определяется т. п. параметром пространственной дисперсии  $d/\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны излучения,  $d$  — характерный размер в среде: диаметр молекулы, параметр кристаллич. решётки и т. п.). В оптич. диапазоне частот параметр дисперсии пространственной дисперсии мал:  $d/\lambda \approx 10^{-4}-10^{-3}$ , и, как правило, вклад эффектов, связанных с нелокальностью нелинейного отклика, несуществен. Но в отд. случаях, напр. при исследовании нелинейного изменения поляризац. характеристик света, генерации чётных оптич. гармоник в изотропных веществах, учёте эффектов пространственной дисперсии обязателен. Велика роль пространственной дисперсии в рентг. диапазоне и для объектов с сильной нелокальностью нелинейного отклика, таких как жидкие кристаллы, экситоны в полупроводниках, биол. макромолекулы.

Измерение  $N. v.$  при измерении  $N. v.$  принято использовать систему единиц СГСЭ. Связь с системой СИ даётся след. соотношениями:

$$\chi^{(2)}[\text{СГСЭ}] = \frac{3}{4} \pi \cdot 10^4 \chi^{(2)}[\text{м}^2/\text{В}, \text{СИ}],$$

$$\chi^{(3)}[\text{СГСЭ}] = \frac{9}{4} \pi \cdot 10^8 \chi^{(3)}[\text{м}^3/\text{В}^2, \text{СИ}].$$

Восприимчивости измеряют, связывая эффективность нелинейного процесса с интенсивностью взаимодействующих в нелинейном процессе волн (напр., в случае генерации 2-й гармоники  $N. v.$  2-го порядка связывают с интенсивностью накачки) [6,7]. При этом используется информация о пространственно-временном профиле взаимодействующих пучков, их спектральном составе, длине исследуемого образца, его ориентации, поляризации излучения и выполнении условий фазового синхронизма. Абс. измерения оптич. нелинейностей — сложная задача, поэтому часто используют относит. измерения. Эталонным кристаллом для относит. измерений 2-й гармоники является кристалл KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), у которого  $\chi^{(2)} = 4,1 \cdot 10^{-9}$  СГСЭ (длина волны накачки  $\lambda = 1,06$  мкм), в ИК-области — кристалл арсенида галлия с  $\chi^{(2)} = 3,2 \cdot 10^{-7}$  СГСЭ ( $\lambda = 10,6$  мкм). Для поиска новых нелинейных материалов широко применяется методика измерения относит.  $N. v.$  в порошках, позволяющая оценить оптич. нелинейность кристаллов и установить возможность синхронных нелинейных взаимодействий, не располагая большими монокристаллич. образцами. Коэф. преломления подавляющего большинства оптич. материалов отличаются не более чем на порядок, а различие кубич.  $N. v.$  составляет более десяти порядков величин. Резонансное значение  $\chi^{(3)}$  для оптич. стёкол и щёлочно-галогенных кристаллов меняется в диапазоне  $(10^{-13}-10^{-12})$  СГСЭ, напр. для LiF  $\chi^{(3)} = 4 \cdot 10^{-13}$  СГСЭ, для прозрачных жидкостей — в диапазоне  $(10^{-12}-10^{-14})$  СГСЭ, напр.  $\text{CS}_2$  имеет  $\chi^{(3)} = 9 \cdot 10^{-14}$  СГСЭ. Полупроводниковые кристаллы имеют, как правило, большую нелинейность: для GaAs  $\chi^{(3)} = 1,5 \cdot 10^{-11}$  СГСЭ, для Si  $\chi^{(3)} = 2 \cdot 10^{-10}$  СГСЭ. Удельные (на одну частоту) резонансные значения кубич.  $N. v.$  для газов лежат в диапазоне  $(10^{-28}-10^{-29})$  СГСЭ, напр. для Ar  $\chi^{(3)} = 3 \cdot 10^{-28}$  СГСЭ, для ато. воздуха  $\chi^{(3)} = 10^{-28}$  СГСЭ. Резонансные  $N. v.$  для газов могут быть на пять-шесть порядков больше. «Гигаватские»  $N. v.$  обнаружены в условиях одноваттового резонанса поглощения в узкозонных полупроводниках (для InSb, HgCdTe  $\chi^{(3)} = (10^{-11}-10^{-4})$  СГСЭ). Исключительно большая нелинейность  $\chi^{(3)} \approx (10^{-3}-10^{-2})$  СГСЭ связана с резонансными процессами поглощения с участием экситонов и биэкситонов в полупроводниках [8]. Коллективные ориентац. нелинейности

в жидких кристаллах достигают величины  $\chi^{(3)} \approx (10^{-1}-10^{-2})$  СГСЭ. При этом время установления нелинейного отклика  $\sim 1$  с.

Нелинейности высших порядков  $\chi^{(n)}$  ( $n \geq 3$ ) существуют для описания таких эффектов, как генерация высших оптич. гармоник в газах и кристаллич. средах, многофотонное поглощение, многофотонная ионизация атомов; ими объясняется ограничение диаметра фокального пятна при самофокусировке света, насыщение эффективности нелинейных процессов при высоких уровнях оптич. возбуждения. При расчёте и измерении высших ( $n \geq 3$ )  $N. v.$  нелинейноопт. процессы разделяют на «чистые» и «каascadeвые» [5]. Напр., 3-я оптич. гармоника в нелинейной среде без центра инверсии может возникнуть как в результате процесса нелинейного смешения трёх волн накачки одинаковой частоты на  $N. v.$   $\chi^{(3)}$ , так и cascade (ступенчатой) при генерации 2-й оптич. гармоники и сложении двух волн с частотами  $2\omega$  и  $\omega$ . Такой комбинацион. процесс может быть описан в терминах эфф. кубич. нелинейностей, причём

$$\chi_{\text{каскад}}^{(3)}(3\omega, \omega, \omega) \sim \chi^{(2)}(2\omega, \omega, \omega) \cdot \chi^{(2)}(3\omega, 2\omega, \omega).$$

В более общем случае

$$\chi_{\text{эфф}}^{(n)} = \chi^{(n)} + \sum_{n_1=1}^n \prod_{i=1}^n \chi^{(n_i)} \psi(n_i),$$

причём ф-ции  $\psi(n_i)$  определяются линейными дисперсионными свойствами среды. Свойства симметрии тензоров  $\chi_{\text{каскад}}^{(n)}$  и  $\chi^{(n)}$ , как правило, идентичны.

Нерезонансные значения величин  $N. v.$  высоких порядков невелики, напр.  $N. v.$  кристалла формата лития для генерации 4-й гармоники  $\chi^{(4)} \sim 1 \cdot 10^{-23}$  СГСЭ, значение восприимчивости 5-го порядка для кристалла кальцита  $\chi^{(5)} \sim 1 \cdot 10^{-27}$  СГСЭ. Удельные (на один атом) нерезонансные  $N. v.$  паров Na, K, Rb, Li измерены вплоть до  $\chi^{(9)}$ ; напр., для натрия в единицах СГСЭ:  $\chi^{(2)} = 8,1 \cdot 10^{-14}$ ,  $\chi^{(6)} = 1,7 \cdot 10^{-28}$ ,  $\chi^{(7)} = 7,0 \cdot 10^{-29}$ ,  $\chi^{(8)} = 4,4 \cdot 10^{-34}$ .

Сильный нелинейный отклик. Концепция  $N. v.$  успешно используется для описания большинства задач нелинейной оптики, однако она имеет ограниченную область применения. В мощных световых полях или в сильнонелинейных средах высшие члены разложения поляризации перестают быть малыми:  $\chi^{(n)} E^{n-1} \approx \chi^{(1)}$ , тогда разложение (1) теряет смысл, а соответствующий ряд (2) перестаёт сходиться. Такие проблемы возникают, в частности, при исследовании насыщения перехода в системе двухуровневых атомов в поле вл.-матн. волны или при описании сильно возбуждённых полупроводниковых кристаллов, когда их отклик на внеш. световое воздействие перестаёт быть однозначной ф-цией интенсивности света, т. е. наблюдаются оптич. гистерезисные явления (напр., гистерезис преломления или поглощения нелинейной средой, *оптическая бистабильность* и неустойчивость). В этом случае материальные ур-ния могут быть замкнуты только в неявном виде  $f(E, P) = 0$ . Напр., для сильнонелинейной изотропной гиротропной среды с учётом кубич. нелинейности ангармонич. осцилляторов, составляющих молекулы, можно записать [9]:

$$P = \chi^{(2)} E - iA[kP] + B\{2(PP^*)P + (PP^*)^2\} - iC\{P(k[PP^*]) + [kP](PP^*)\}.$$

Здесь  $A, B, C$  — частотно-зависимые коэф.,  $k$  — волновой вектор. Это ур-ние имеет более широкую, чем (3), область применимости и допускает гистерезисные решения для поляризации  $P$ .

Лит.: 1) А х м а н о в С. А., Х о х л о в Р. В., Проблемы нелинейной оптики, М., 1964; 2) Б л о ж е р з и Н., Нелинейная оптика, пер. с англ., М., 1966; 3) Ш е н И. Р., Триллионы нелинейной оптики, пер. с англ., М., 1988; 4) С и р о т я и Ю. И., Ш а с к о л ь с к а я М. П., Основы кристаллофизики, 2 изд.,

М., 1979; 5) Нелинейная синхротроника, под ред. Н. Бломбергена, пер. с англ., М., 1979; 6) Справочник по лазерам, пер. с англ., под ред. А. М. Прохорова, т. 2, М., 1978; 7) Церикине Ф., Мидвистер Д.ж., Прикладная нелинейная оптика, пер. с англ., М., 1978; 8) Journal of the Optical Society of America, 2B, Special Issue, "Excitonic Optical Nonlinearities", 1985; 9) Ахмедов С. А., Желудев Н. И., Святицкий Ю. П. Неустойчивость поляризации световой волны в сильно-нелинейной среде, «Изв. АН СССР, Сер. Физ.», 1982, т. 46, с. 1070.

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ** — изменение сигнала  $S_{\text{вых}}(t)$ , приводящее к искажению передаваемого сообщения  $S_{\text{вх}}(t)$ , обусловленное нелинейностью оператора тракта передачи  $L$  (в т. ч. в присутствии помех):  $S_{\text{вых}}(t) = LS_{\text{вх}}(t)$ . Н. и. возникает в нелинейных и нелинейно-параметрич. цепях, обладающих свойством порождать новые составляющие в спектрах проходящих через них сигналов. Различают собственно Н. и. — Н. п. полезного сигнала в отсутствие помех, и Н. и. помех — Н. и. полезного сигнала, обусловленные нелинейностью цепи под действием помех. Оценку Н. и. проводят либо по степени искажения тестовых сигналов, либо по характеристикам оператора, тракта передачи. В первом случае, при  $k$ -ром тестовым сигналом является синусоидальное напряжение, наиб. удельным коэф. гармоник искажений  $K_n(\%)$  или затухание  $B$  [дБ]:

$$K_n = \frac{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots}}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}} \cdot 100\%$$

$$B = 20 \lg \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots}}$$

где  $A_i$  — амплитуда  $i$ -й гармоники сигнала. Оценка Н. и. по характеристикам оператора тракта передачи основана на аппроксимации их выражениями, параметры  $k$ -рых зависят от степени нелинейности. В трактах с резистивной нелинейностью оценку проводят либо по амплитудной характеристике, либо методом угла отсечки с последующим вычислением коэф. Берга. В трактах с комплексным характером нелинейности используют метод рядов Вольтерра.

Лит.: Богданов И. В. М., Нелинейные искажения в приемно-передающих устройствах. М., 1980.

**НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ** — процессы в колебат. и волновых системах, не удовлетворяющие суперпозиции принципу. Нелинейные колебания или волны в общем случае взаимодействуют между собой, а их характеристики (частота, форма колебаний, скорость распространения, вид профиля воли и др.) зависят от амплитуды. Н. к. и в. в системах разл. физ. природы имеют общие черты, проявляющиеся в единстве их матем. описания. Изучению Н. к. и в. посвящена теория нелинейных систем — нелинейная динамика.

**НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ** — колебательные (волновые) системы, процессы в  $k$ -рых не удовлетворяют суперпозиции принципу, в отличие от линейных систем. Все реальные физ. системы нелинейны, их можно считать линейными лишь приближенно — при малой интенсивности колебат. и волновых процессов. Матем. образом Н. с. являются нелинейные ур-ния (см. *Нелинейные уравнения математической физики*). Изучением колебат. и волновых процессов в конкретных Н. с. занимается гидроакустика, нелинейная оптика, нелинейная акустика, физика плазмы (см. *Нелинейные явления в плазме*), а также химия, биология, экология, социология и др. В то же время многие Н. с. совершенно разл. природы имеют одинаковое матем. описание. Соответственно, совпадает и характер протекающих в них процессов. Это послужило основой для развития единого подхода к изучению Н. с., позволило выработать базовые модели, образы и понятия и проанализировать осн. колебат. и волновые явления в Н. с. вие зависимости от их конкретной природы.

Аналитич. описание процессов в Н. с. затруднено ввиду отсутствия общих методов решения нелинейных ур-ний. Наиб. доступно изучение динамики слабонелинейных систем. Описывающие их ур-ния содержат нелинейные члены с малым параметром, что позволяет использовать разл. варианты метода возмущений (см. *Возмущения теории*). Нелинейность в таких системах проявляется либо в возникновении малых поправок к решению линеаризов. системы ур-ний, получаемой в пренебрежении нелинейными членами, либо, что более важно, в медленном изменении его параметров. При исследовании сильнонелинейных систем, за исключением ограниченного числа точно решаемых случаев, используется численное моделирование.

Разделяют два класса Н. с. — консервативные системы, в  $k$ -рых энергии колебательных (волновых) процессов сохраняется, и неконсервативные системы, в  $k$ -рых энергия диссипирует (*диссипативные системы*) или поступает в систему от внеш. источников (активные системы). Прогресс в изучении консервативных Н. с. в значит. мере обусловлен возможностью применения к большинству из них аппарата *гамильтонова формализма*. Во многих практически важных случаях гамильтонов Н. с. совпадает с выражением для энергии системы. Известны, однако, консервативные Н. с., для  $k$ -рых гамильтоново описание не построено. Для биол., экологич., социологич. и т. п. Н. с., в  $k$ -рых строгое определение консервативности с использованием интеграла энергии не применимо, также принято указанное деление, основанное на аналогии их описания с физ. Н. с.

**Консервативные Н. с.** Простейшим примером поведения консервативной Н. с. являются колебания нелинейного осциллятора, описываемые ур-нием  $\ddot{x} + f(x) = 0$ .

Если ф-ция  $f(x)$  линейна [ $f(x) \sim x$ ], то осциллятор линейный. Ур-ние нелинейного осциллятора описывает, напр., колебания матем. маятника, изменяется тона и напряжения в колебат. контуре, в  $k$ -ром индуктивность катушки зависит от величины тока и (или) емкость конденсатора зависит от напряжения, а также движение иона в просторанстве неоднородном электр. поле и др. На рис. 1 приведены вид потенциального рельефа  $\varphi(x)$  и соответствующие ему фазовые траектории — траектории движе-

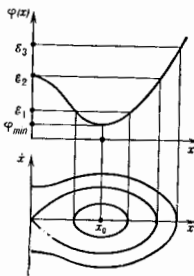


Рис. 1. Потенциал электрического поля  $\varphi(x)$  и фазовые траектории, соответствующие движению иона в данном поле при различных значениях энергии  $\epsilon$ .

ния пообразующей точки Н. с. в фазовом пространстве  $(x, \dot{x})$ . Энергия заряд. частицы, движущейся в стационарном электр. поле, сохраняется:

$$\epsilon = \frac{m\dot{x}^2}{2} + q\varphi(x) = \text{const}$$

(где  $m, q$  — масса и заряд частицы;  $q > 0$ ). Это выражение определяет гамильтонов осциллятора. Дифференцирование его по времени даёт ур-ние нелинейного осциллятора, где  $f(x) = q/m\varphi_x$ . Осциллятор является линейным лишь при условии  $\varphi(x) \sim x^2$ , т. е. при параболич. потенциальном рельефе. При этом его колебания являются гармоническими и изохронными — их частота не зависит от амплитуды. Как видно из рис. 1, осциллятор имеет два состояния равновесия ( $\dot{x} = 0$ ;

центр (при  $x = x_0$ ) и седло (при  $x = 0$ ), первое из них устойчиво (локальный минимум потенц. энергии), второе неустойчиво. Вышедшая из состояния покоя при  $x = x_0$  частица совершает колебания в окрестности этой точки (замкнутые кривые на рис. 1). При малых отклонениях  $x$  от  $x_0$  осциллятор является линейным, т. к.  $\Phi - \Phi_{\text{линейн}} \sim (x - x_0)^3$  при  $x \rightarrow x_0 \rightarrow 0$ . С ростом энергии осциллятора  $\Phi$  фазовая траектория приближается к сепаратрисе. Колебания осциллятора становятся ангармоническими (возникают гармоники осн. частоты), т. к. всё большую часть периода занимают участки медленного движения частицы. Период колебаний возрастает с ростом их амплитуды и на сепаратрисе равен бесконечности (частица приближается к неустойчивому состоянию равновесия с бесконечно малой скоростью бесконечно долго). Т. о., колебания нелинейного осциллятора невозвратны — их период зависит от амплитуды (энергии).

В отличие от линейных систем, в Н. с. возможно взаимодействие колебаний (или волн) между собой. Точное взаимодействие имеет, напр., место в системе трёх нелинейно связанных осцилляторов, описываемой системой ур-ний

$$\ddot{x}_i + \omega_i^2 x_i = \mu \alpha_i x_i x_j x_k; \quad i = 1, 2, 3; \quad j, k \neq i.$$

При малом  $\mu$  — это слабонелинейная система. Поведение её близко к суперпозиции квазигармонич. колебаний осцилляторов с медленно меняющимися амплитудами. Благодаря нелинейной связи колебания двух осцилляторов с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  порождают в системе колебания с комбинац. частотами  $\omega_1 \pm \omega_2$ . Действие малой нелинейности накапливается, если выполнено условие резонанса частот

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3.$$

Эфф. обмен энергией между осцилляторами происходит, когда возбуждён ВЧ-осциллятор и энергия колебаний передаётся двум НЧ-осцилляторам — т. н. распадная неустойчивость, либо когда возбуждены два НЧ-осциллятора и идёт обратный процесс — слияние НЧ-колебаний. Подобный обмен энергией может быть периодическим (рис. 2).

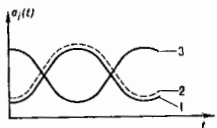


Рис. 2. Изменение амплитуд колебаний трёх взаимодействующих осцилляторов ( $\omega_3 > \omega_1, \omega_2$ ).

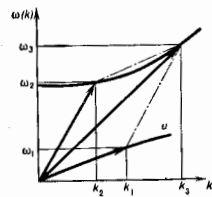


Рис. 3. Дисперсионные зависимости ионно-звуковых (1) и ленгмювских (2) волн в плазме и диаграмма, иллюстрирующая условия синхронизма трёх взаимодействующих волн.

ей волн эффективно взаимодействует ограниченное число волн, связанных с условиями резонанса частот и волновых векторов — условиями синхронизма. Для случая трёх взаимодействующих волн, напр. ионно-звуковой и ленгмювских волн в плазме (см. *Взаимодействие волн в плазме*), они имеют вид (рис. 3):

$$\omega_1(k_1) + \omega_2(k_2) = \omega_3(k_3), \\ k_1 + k_2 = k_3.$$

Как и при взаимодействии нелинейно связанных осцилляторов, здесь возможны распадная неустойчивость и слияние волн.

В отсутствие дисперсии волн в Н. с. в синхронизме с исходной квазиомохроматич. волной находится все её гармоники. Поэтому если исходная волна гармоническая, то она порождает за счёт нелинейности гармоники с кратными частотами и волновыми числами, причём с течением времени возбуждаются всё более высокочастотные гармоники. На пространственно-временном языке этот процесс соответствует искажению профиля исходного возмущения (рис. 4) и описывается ур-нем простой волны

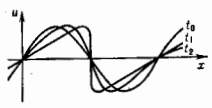


Рис. 4. Эволюция профиля исходной гармонической волны в отсутствие дисперсии волн ( $t_0 < t_1 < t_2$ ).

$$u_t + u u_x = 0,$$

крое отвечает, в частности, нелинейной акустик. волнам в системе отсчёта, движущейся со скоростью звука малой амплитуды и отражает зависимость скорости распространения возмущения от его интенсивности. Решением его являются простые волны (или Рима-на волны)  $u = U(t - x/u)$ , вид ф-ции  $U$  задается нач. возмущением. При  $u > 0$  точки профиля с течением времени сдвигаются в направлении распространения волны, а при  $u < 0$  — в противоположном. Профиль волны искажается, и в нек-рой момент времени величина  $u_x$  становится бесконечной — происходит «проклядывание» волны. Применительно ур-ния нарушается.

Наличие дисперсии волн в области ВЧ стабилизирует «проклядывание», т. к. ВЧ-гармоники выходят из синхронизма и практически не возбуждаются. В результате противодействия нелинейности и дисперсии в безграничной Н. с. могут возникнуть т. н. стационарные волны, распространяющиеся с пост. скоростью без изменения формы профиля: периодич. волны сложной формы и уединённые волны — солитоны.

Наряду с взаимодействием волн в Н. с. важную роль играют эффекты самовоздействия. Если в Н. с. в силу особенностей дисперсионных характеристик условия трёхволнового взаимодействия не выполнены, то наиб. существенным является самовоздействие квазиомохроматич. волны. Оно возникает, напр., при распространении эл.-магн. волны в среде с показателем преломления, зависящим от интенсивности поля. В частности, пучок света в такой среде формирует неоднородное поперёк лучка распределение показателя преломления, подобное линзе, что в свою очередь может привести к его фокусировке — происходит *самофокусировка света*. Аналогично возникает самодулляция квазиомохроматич. волн в направлении их распространения и самосжатие волновых пакетов, приводящее к образованию стационарных волн обтекающих нелинейных волновых пакетов, в т. ч. солитонов.

В Н. с. даже в отсутствие случайных воздействий возможны чрезвычайно сложные, нерегулярные колеб. и волновые режимы, требующие для своего описания привлечения вероятностных методов, — т. н. *стохастические колебания*. Такие колебания могут совершать, напр., частица в дуэльном потенц. поле при нек-рых формах потенц. рельефа. Стохастическим является также взаимодействие квазиомохроматич. волн в нелинейной среде, когда возбуждено много волн и каждая из них участвует во мн. элементарных взаимодействиях, удовлетворяющих условиям синхронизма, — т. н. слабая турбулентность (см. *Турбулентность плазмы*).

Неконсервативные Н. с. Наиб. простое проявление диссипации в системе — затухание колеб. и волновых процессов. Однако в безграничной Н. с. благодаря диссипации существует режим, отсутствующий в кон-

сервативных Н. с., — ударные волны, в т. ч. стационарные ударные волны, имеющие вид бегущего перепада (скачка) к.-л. физ. параметров, напр. давления в акустич. ударной волне. Ударные волны возникают как результат эволюции простых волн: энергии ВЧ-гармоник, генерируемых за счёт нелинейности, эффективно поглощается и «процикливается» волны не прекращают.

В прикладном отношении наиб. важны нелинейные эффекты в активных Н. с., в к-рых энергии колебаний может пополняться вследствие неустойчивостей, обусловленных неравновесностью системы. К таким Н. с. относятся прежде всего генераторы колебаний — от лампового до квантовых (мазеров и лазеров), тасы — от ходиков до кварцевых и т. п., в к-рых устанавливаются устойчивые незатухающие колебания с периодом и амплитудой, в широких пределах не зависящими от нач. условий — автоколебания. Простейший генератор автоколебаний — автогенератор на ламповом триоде, в к-ром потеря энергии в колебат. контуре компенсируется пополнением её за счёт неперюдич. источника (батареи). Поступление энергии в контур в нужной фазе колебаний осуществляется при помощи обратной связи на управляющий электрод лампы. При перестройке параметров Н. с. могут происходить качественные изменения её поведения — бифуркации. Например, колебания в ламповом генераторе возникают при величине обратной связи, большей некоего бифуркационного значения.

Как и колебания в консервативных Н. с., колебания в активных Н. с. могут быть не только регулярными, но и стохастическими. Существуют генераторы стохастич. автоколебаний — Н. с., в к-рых возможны незатухающие хаотич. колебания со сплошным спектром за счёт энергии шумовых источников. Самовозрождение в Н. с. стохастич. колебаний — один из возможных путей возникновения турбулентности.

В активных колебат. Н. с., в к-рых возможно одновременно существование мп. мод (типов) колебаний с разл. частотами, получающих энергию от общего источника, возникает явление конкуренции мод, т. к. связь между модами порождает зависимость нелинейного затухания или усиления каждой из мод от интенсивности других. Конкуренция мод приводит к тому, что в итоге преобладает одна из них и колебания автогенератора происходят на соответствующей ей частоте. Если моды равноправны и связь их взаимна, то устанавливается режим генерации моды, преобладавшей вначале. В таких Н. с., как, напр., лазер, конкуренция мод происходит и во времени, и в пространстве, что приводит, и частности, к установлению в пространственно-симметричном протяжённом автогенераторе несимметричных в пространстве распределений поля с преобладанием одной из встречных волн. Это один из простейших примеров самоорганизации в Н. с., — возникновение пространственного порядка из нач. беспорядка и образование сложных пространственных структур в однородных (протяжённых) неравновесных Н. с. (физ., хим., биологических и т. п.). Примерами самоорганизации в Н. с. являются кооперативные ячейки жидкости, подогретой снизу, волны горения, волны популяций в экологич. системах, волновые возбуждения в сердечной ткани.

Лит.: Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э., Теория колебаний, 3 изд., М., 1981; Гурелин Г. С., Колебания и волны, 2 изд., М., 1969; Уизем Д. Дж., Линеиные и нелинейные волны, пер. с англ., М., 1977; Рабинович М. И., Трубецков Д. И., Введение в теорию колебаний и волн, М., 1984. А. Я. Басович

**НЕЛИНЕЙНЫЕ УРАВНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ** — ур-ния, не обладающие свойством линейности; применяются в физике как матем. модели нелинейных явлений в разл. сплошных средах. Н. у. м. ф. — важная часть матем. аппарата, используемого в фундам. физ. теориях: теории тяготения и квантовой теории поля.

Строго говоря, все сплошные среды описываются нелинейными ур-ниями. Выбор для описания среды линейных или нелинейных ур-ний зависит от роли, к-рую играют нелинейные эффекты, и определяется конкретной физ. ситуацией. Напр., при описании распространения лазерных импульсов необходимо учитывать зависимость показателя преломления среды от интенсивности эл.-магн. поля. Возникающие при этом Н. у. м. ф. являются основой матем. аппарата *нелинейной оптики*.

Линейные ур-ния, используемые в физике, являются результатом линеаризации более точных Н. у. м. ф. на фоне их простейших (фоновых) решений. Исторически первым примером Н. у. м. ф. были найденные в 18 в. Эйлером уравнения для идеальной жидкости:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla)v + \rho^{-1} \nabla P = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\rho$ ,  $P$ ,  $v$  — плотность, давление и скорость жидкости. Для баротропной жидкости, когда  $P = P(\rho)$ , ур-ния Эйлера можно линеаризовать на фоне тривиального решения  $\rho = \rho_0$ ,  $v_0 = 0$  в предположении потенциальности поля скоростей:  $v = \nabla \varphi$ . Полагая  $\rho = \rho_0 + \delta \rho$ ,  $\delta \rho \ll \rho_0$ , получаем из (1) *волновые уравнения* для звуковых волн. Однако при рассмотрении вихревых движений жидкости, когда её можно считать несжимаемой,  $\rho = \rho_0$ ,  $\operatorname{div} v = 0$ , ур-ния Эйлера (1) становятся существенно нелинейными. Их линеаризация на фоне решения  $v_0 = 0$  приводит к тривиальному ур-нию  $\partial v / \partial t = 0$ .

Т. о., линеаризация Н. у. м. ф. не всегда ведёт к содержат. результату. Может оказаться, что линеаризация имеет смысл, но линейные ур-ния сокращают применение лишь конечное время. Эта ситуация типична, если фоновое решение неустойчиво, во может иметь место и при устойчивом фоновом решении. Так, омонерные ур-ния Эйлера

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P(\rho)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

при произвольном нач. условии  $\rho \rightarrow \rho_0$ ,  $v \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \pm \infty$  описывают образование *ударных волн*. При этом за достаточно большое время теряют применимость не только линейное приближение, но и сами ур-ния (2), решения к-рых при  $t \rightarrow \infty$  становятся неоднозначными.

Даже если линеаризация Н. у. м. ф. возможна, с точки зрения физики исключительно важны существенно нелинейные решения, качественно отличающиеся от решений линейных ур-ний. Такими могут быть стационарные решения солитонного типа, локализованные в одном или нескольких измерениях (см. *Солитон*), или решения типа *волновых коллапсов*, описывающие самопроизвольную концентрацию энергии в небольших областях пространства (см. также *Самософокусировка света*). Существенно нелинейными являются и стационарные решения ур-ний гидродинамики. Весьма важен вопрос об устойчивости существенно нелинейных решений, в т. ч. гидродинамич. течений и солитонов, к-рым решается либо при помощи линеаризации Н. у. на фоне изучаемых решений, либо при помощи вариац. оценок.

Решения Н. у. м. ф. во мп. случаях обнаруживают тенденцию к стохастизации. В этом случае они требуют статистич. описания, что составляет предмет теории *турбулентности*. Турбулентность часто развивается как результат неустойчивости фонового состояния. Если уровень нелинейности решения остаётся малым, то говорят о слабой турбулентности, в противном случае — о сильной турбулентности. Сильная турбулентность может сопровождаться волновыми коллапсами, делком или частично состоять из взаимодействующих солитонов.

**Нелинейные уравнения в физике.** Н. у. м. ф., встречающиеся в физике, отличаются большим разнообразием. Их значит. часть представляет собой обобщения гидродинамич. ур-ний Эйлера, напр. *Наве* — *Стокса уравнения* для описания движений вязкой несжимаемой жидкости. Описываемая ими гидродинамич. турбулентность является предельно сильной.

В метеорологии были выведены ур-ния Буссинеска, описывающие движение несжимаемой жидкости в поле тяжести и сил Кориолиса и используемые в океанологии и физике атмосферы. Ур-ния *магнитной гидродинамики* описывают движение проводящей жидкости в магн. поле и применяются в астрофизике и физике плазмы.

Классич. примером Н. у. м. ф. являются уравнения теории упругости. Развитие микроскопической теории кристаллов дополнило их уравнениями равновесия и динамики дислокаций, также существенно нелинейными.

Многие Н. у. м. ф. возникли в физике в связи с развитием теории конденсов. сред, они описывают макроскопич. проявления квантовомеханич. эффектов; важностью ф-ций в них является плотность параметра порядка (см. *Газовый переход*). Если параметр порядка скалярный, это двухжидкостные ур-ния гидродинамики сверхтекучего гелия (см. *Сверхтекучесть*), ур-ния Гинзбурга — Ландау и их обобщения, описывающие магнетостатику и электродинамику сверхпроводников (см. *Сверхпроводимость*). Если параметр порядка векторный или тензорный, это ур-ния Ландау — Лифшица, описывающие ферромагнетику и антиферромагнетику, ур-ния обобщенной гидродинамики сверхтекучего гелия, макроскопич. модели жидких кристаллов. Для всех этих ур-ний наиб. интерес представляют их существенно нелинейные решения, часто описываемые локализованные (хотя бы частично) объекты: вихри в жидком гелии и в сверхпроводниках, доменные стенки в ферромагнетиках и антиферромагнетиках, дислокации в жидких кристаллах и солитоны, к-рые в том или ином виде существуют во всех упомянутых средах.

Н. у. м. ф. возникают также как результат применения приближения Хартри — Фока к многочастичным квантовомеханич. системам и имеют в этом качестве применения в атомной и ядерной физике. Ещё одним источником Н. у. м. ф. является хим. физика. Это — Н. у. диффузии, описывающие волны горения и детонации, а также колебат. хим. реакции (см. *Автотонны*). К ним примыкают возникшие в биофизике ур-ния, описывающие распространение импульса по первому волоку. Ур-ния этих типов возникают в задачах о самоорганизации (см. *Синергетика*) и диссипативных структурах.

Н. у. м. ф. играют важную роль и в фундам. физике, напр. ур-ния Эйнштейна для гравитацион. поля (см. *Тяготение*). Ур-ния Эйнштейна в вакууме имеют ясный геом. смысл, описывая римановы пространства. Риччи-тензор к-рых равен нулю. Геом. интерпретацию имеют и мн. Н. у. в квантовой теории поля, в частности *Янга — Миллса поля*.

Локализов. решения Н. у. м. ф. в квантовой теории поля можно рассматривать как точки стационарной фазы при квазиклассич. вычислениях функциональных интегралов, для *Грича функций*, содержащих информацию о спектре масс и сечениях взаимодействия элементарных частиц. Если точкам стационарной фазы соответствуют траектории подбарьерных переходов между топологически неэквивалентными вырожденными состояниями вакуума, классич. Н. у. м. ф. следует рассматривать в майном времени, т. е. не в пространстве Минковского, а в четырёхмерном евклидовом пространстве. Локализов. решения таких ур-ний — четырёхмерные солитоны — получили назв. *инстантонов*.

Ур-ния Янга — Миллса описывают частицы, обладающие *асимптотической свободой*. В двумерном про-

странстве-времени этим же свойством обладает ур-ние *n*-поля:

$$\nabla_{\eta\eta} + n(\nabla_{\eta} n) = 0 \quad (3)$$

(здесь  $\xi = x + t$ ,  $\eta = x - t$  — «координаты» переменные). Это ур-ние является частным случаем более общего ур-ния «главного кривального поля»

$$\xi_{\eta\eta} + (\xi_{\eta} g^{-1} \xi_{\eta} + g \eta g^{-1} \xi_{\eta})/2 = 0 \quad (4)$$

(здесь  $g$  — элемент некр-рой группы Ли). Инстантоновые решения этого ур-ния можно использовать для описания солитонных конфигураций в жидком гелии.

Универсальные модели. В этих моделях проявляется одна из характерных черт теории Н. у. м. ф.: среди огромного их многообразия можно выделить небольшое число ур-ний сравнительно простого вида, к-рые можно использовать как матем. модели различных по своей природе физ. ситуаций. Эти ур-ния играют, в известном смысле, ту же роль, что и классич. ур-ния в частных производных (ур-ние Лапласа, ур-ние диффузии, волновое ур-ние).

К числу таких универсальных моделей относятся *Кортвега — де Фриса уравнение*, *Шрёдингера уравнение нелинейное*, *синус-Гордона уравнение*, *Кадомова — Петвиашвили уравнение*, *Бюргера уравнение*, *Хозлова — Заболотской уравнение* и др. Необходимо отметить еще систему ур-ний «трёх волн»:

$$\begin{aligned} \partial u_0 / \partial t + (v_0 \nabla u_0) &= i u_1 u_2, \\ \partial u_1 / \partial t + (v_1 \nabla u_1) &= i u_0 u_2, \\ \partial u_2 / \partial t + (v_2 \nabla u_2) &= i u_0 u_1, \end{aligned} \quad (5)$$

являющуюся универсальной моделью для описания параметрич. взаимодействий волн в нелинейных средах. Система (5) допускает многочисл. обобщения.

Большое разнообразие встречающихся в физике Н. у. м. ф. затрудняет развитие общих матем. методов их исследования. Лишь для сравнительно немногих Н. у. м. ф. доказаны теоремы существования и единственности, к таким относятся ур-ния Янга — Миллса, ур-ния Навье — Стокса в двумерном случае, ур-ния газовой динамики. Для ур-ний Навье — Стокса в трёхмерном случае теорема единственности решения задачи Коши до сих пор не доказана. Затруднена даже проблема классификации Н. у. м. ф. Часть их попадает под классич. разделение на эллиптич., гиперболич. и параболич. ур-ния, но значит. число важных Н. у. м. ф. (средя них Кортвега — де Фриса ур-ние, Кадомова — Петвиашвили ур-ние) не могут быть отнесены ни к одному из этих типов. Нек-рую классификацию Н. у. м. ф. можно осуществить на основе физ. соображений. Прежде всего это разделение на стационарные и эволюц. ур-ния. Большинство стационарных ур-ний относится к эллиптич. типу. Среди эволюц. ур-ний, явно содержащих производные по времени, можно выделить консервативные Н. у. м. ф., сохраняющие интеграл энергии, и диссипативные Н. у. м. ф., описывающие «открытые системы», обменивающиеся энергией с «внешним миром». Одним из интересных достижений теории Н. у. м. ф. было обнаружение того факта, что консервативные Н. у. м. ф., как правило, являются гамма-тоновыми системами, хотя явное введение канонич. переменных зачастую оказывается трудной задачей. Установлена гамма-тоновая природа большинства консервативных обобщений ур-ний Эйлера и даже системы ур-ний Власова, описывающих плазму без столкновений. Для гамма-тоновых систем, близких к линейным, развиты методы теории возмущений, позволяющие учитывать нелинейные эффекты и производить статистич. описание решений. Все перечисленные выше универсальные Н. у. м. ф., за исключением Бюргера ур-ния и Хозлова — Заболотской ур-ния, являются гамма-тоновыми.



Точные решения. Для физики важно знать как можно больше точных решений Н. у. м. ф., особенно существенно нелинейных. Простейшие из таких решений можно находить, используя очевидные свойства симметрии Н. у. м. ф., а также отыскивая всевозможные автомодельные подстановки (см. *Автомодельность*). Более тонкие способы вычисления точных решений используют методы теории группы Ли. Пусть Н. у. м. ф. для  $f$ -ции двух переменных  $u(x, t)$  имеет вид

$$u_t = F(u, u_x, \dots, u_n), \quad u_k = d^k u / dx^k. \quad (6)$$

$f$ -ция  $f(u, u_x, \dots, u_n, x, t)$  ваз. с симметрией уравнения (6), если оно совместно с ур-нием  $u_t = f(u, u_x, \dots, u_n, x, t)$ , где  $t$  — новая переменная. Симметрии образуют алгебру Ли относительно скобки Пуассона

$$\{f, h\} = \sum_{k=0}^n \left( \frac{\partial f}{\partial u_k} \frac{\partial h}{\partial x^k} - \frac{\partial h}{\partial u_k} \frac{\partial f}{\partial x^k} \right).$$

По алгебре симметрий Н. у. м. ф. восстанавливают группу Ли — Беклунда непрерывных преобразований, оставляющих Н. у. м. ф. инвариантным. Точные решения Н. у. м. ф. находят как решения, остающиеся инвариантными при действиях из-ли, подгруппы группы Ли — Беклунда. Группа Ли — Беклунда и алгебра симметрий существуют у каждого Н. у. м. ф. В большинстве случаев группа Ли — Беклунда является конечномерной. Существуют, однако, случаи, когда эта группа бесконечномерна, как у всех перечисленных выше универсальных Н. у. м. ф.

Если преобразование из группы Ли — Беклунда оставляет инвариантным функционал действия гамильтонова Н. у. м. ф., то оно имеет интеграл движения — функционал, не зависящий от времени. Интегралы движения образуют алгебру Ли относительно скобок Пуассона, изоморфную нек-рой подалгебре алгебры симметрий.

Перечисленные выше универсальные гамильтоновы Н. у. м. ф. обладают бесконечными наборами независимых интегралов движения. Ур-ния, обладающие этим свойством, несколько условно наз. интегрируемыми, хотя интегрируемость (см. *Гамильтонова система*) доказана лишь для немногих из них. Интегрируемыми являются, в частности, одномерные ур-ния Эйслера (2).

Обширный класс интегрируемых Н. у. м. ф. составляют ур-ния, к к-рым применим *обратной задачи рассеяния метод*. Для этих ур-ний, к к-рым относятся, в частности, перечисленные выше универсальные гамильтоновы системы, возможно явное вычисление большого кол-ва точных решений, в т. ч. описывающих солитоны и их взаимодействия. При помощи метода обратной задачи удается вычислять инстантные решения ур-ний Игга — Миллса, а также найти многочисленные точные решения ур-ний Эйштейна.

Если Н. у. м. ф. не обладает бесконечной группой Ли — Беклунда, возможности его аналитич. исследования сильно ограничены. В ряде случаев можно, используя разложение по набору заданных  $f$ -ций (метод Галеркина), свести его к системе обыкновенных дифференц. ур-ний, к-рую можно изучать качеств. методами, а также интегрировать при помощи ЭВМ. Таким способом удается моделировать не слишком развитую турбулентность, в т. ч. изучать *странные аттракторы*. Наконец, если число независимых переменных, входящих в Н. у. м. ф., не превышает три, оказывается достаточно эффективным их прямое численное решение на ЭВМ.

Лит.: Уизем Дж., *Линейные и нелинейные волны*, пер. с англ., М., 1977; Теория солитонов. Метод обратной задачи, М., 1980; A. P. I. & I. 2. M. J., S. G. & I. H., Solitons and the inverse scattering transform, Phil., 1981; Ибрагимов Н. Х., Группы преобразований в математической физике, М., 1983.

В. Е. Золотов.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПЛАЗМЕ — возникают в результате взаимодействия волн, полей и час-

тици при к-рых не выполняется принцип суперпозиции волн и к-рые описываются с учетом нелинейных слагаемых в ур-ниях кинетики или динамики плазмы в ур-ниях Максвелла. Плазма, в особенности магнитоактивная, — уникальная нелинейная среда, в к-рой нелинейные явления связаны не только с большим числом эл.-магн. волн разл. типов поляризации и пространственно-временных масштабов, но и с существованием резонанса заряд. частиц с волнами и их биениями, а также волновых движений частиц, не приводящих к возбуждению эл.-магн. полей (т. н. моды Ван-Кампена). Это приводит к тому, что в плазме возникают не только практически все нелинейные явления, к-рые характерны для др. нелинейных сред (самофокусировка волн, их укручение, самосжатие пакетов волн, распадная, модуляц. и вырванная неустойчивости, вынужденное комбинац. рассеяние волн, обращение волнового фронта, генерация гармоник, образование солитонов и ударных волн и т. п.), но и явления, отсутствующие в др. средах, такие, как индукцион. рассеяние заряд. частиц, квазилинейная релаксация и слабая турбулентность — эффекты фазовой памяти частиц, приводящие к плазменному эху, нелинейное затухание Ландау (резко отличное от линейного), спателитные неустойчивости волн и т. п. В отличие от нелинейной акустики и нелинейной оптики, Н. я. в п. возникают при достаточно малых амплитудах волн, что позволяет говорить о ней как о среде с резко нелинейными волновыми свойствами. Как и в др. нелинейных волновых средах, в плазме различают два типа нелинейных волновых явлений — ламинарные, с динамически меняющимся или фиксированными фазами волн, и турбулентные, с хаотическим меняющимся фазами волн. В ламинарной, или динамич. теории Н. я. в п. особое место занимают периодич. волны, для к-рых обычно характерны три типа взаимод. действий: волна + волна; волна + частица; волна + частица — волна. Два последних типа взаимодействия. Взаимодействие первого типа основано на резонансе трёх волн: биеение, образованное двумя волнами, попадает в резонанс с третьей волной. В этом случае необходимо одновременно выполнение условий как временного резонанса:  $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$ , так и пространственного:  $k_1 = k_2 + k_3$ , где  $\omega_i$  и  $k_i$  — соответственно частоты и волновые векторы резонансно взаимодействующих волн. Условие временного резонанса (поможет на  $\hbar$ ) совпадает с условием распада элементарного возбуждения  $\mathcal{H}_1(\omega_1, k_1)$  на два других:  $\mathcal{H}_2(\omega_2, k_2)$  и  $\mathcal{H}_3(\omega_3, k_3)$ . Поэтому их часто наз. распадными условиями, а соответствующий процесс — распадным взаимодействием волн.

Второй тип взаимодействия (волна — частица) можно считать почти линейным. Взаимодействием является наиб. сильным, когда частица находится в резонансе с волнами. В плазме без магн. поля условия резонанса частицы, имеющей скорость  $v$ , с волной имеют вид:  $v = \omega/k$ . Такое взаимодействие на примере лентимировских (эл.-статических) волн ведёт к захвату частиц в потенци. ямы волн, следствием чего является *Ландау затухание*.

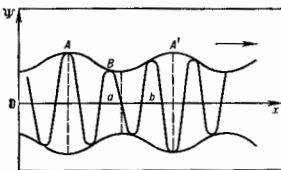
При взаимодействии волна — частица — волна биеение от двух волн попадает в резонанс с частицами  $\omega_1 - \omega_2 = (k_1 - k_2)v$  или  $v = (\omega_1 - \omega_2)/(k_1 - k_2)$ . Часто такое взаимодействие наз. нелинейным затуханием Ландау либо индукцион. рассеянием частиц на волнах.

Кроме явлений взаимодействия волн и частиц в Н. я. в п. относятся также самовоздействие волн; простейшим типом последнего является процесс рождения кратных гармоник. Так, напр., генерация 2-й гармоники возникает за счёт того, что происходит «взаимодействие» волны самой с собой, когда частота биеения есть  $2\omega$ , а волновой вектор  $2k$ . Это биеение может либо погаснуть, либо не попасть в резонанс с собств. колебанием плазмы. Условием резонанса биеения с собств. колебанием является  $2\omega/2k = \omega(2k)/2k$ , где  $\omega(2k)$  — частота

совств. колебания плазмы, соответствующего волновому вектору  $2k$ . Это условие выполняется для т. н. линейных спектров, когда  $\omega = kv_0$ ; в этом случае все кратные гармоники находятся в резонансе с бегущими соответствующей кратности. Для волн конечной амплитуды, относительно слабо затухающих, это приводит к укрупнению первоначально синусоидальных волн, при этом образуются сначала параметрон — ударные волны. Укрупнение волн останавливается лишь выходом на резонанс кратных гармоник. Существует два реал. механизма выхода из резонанса. Первый связан с поглощением энергии волн за счёт вязкости, трения и т. п. Математически в этом случае  $\omega$  частот гармоник появляется лишняя добавка, приводящая к расстройке резонанса. Нарастание гармоник прекращается, когда подача энергии в гармонику сравняется с её потерей за счёт диссипации. В спектре возникает насыщение, что приводит к установлению конечной ширины фронта ударной волны. Др. механизм, останавливающий рост гармоник, — это нелинейная зависимость частоты от волнового вектора. В плазме такая ситуация довольно часто случается (см. *Волны в плазме*). В этом случае кратные гармоники образуются не резонансно с совств. волнами, а вынужденным образом. Разрыв на фронте не возникает. При опред. условиях волна может двинуться без искажения своей формы. В частности, могут образовываться удлинённые волны — солитоны.

Волны большой амплитуды в плазме приводят к появлению большой группы параметрич. неустойчивостей, к-рые вызываются резонансным взаимодействием волн и обычно возникают, если амплитуда волн как-либо превышает нек-рый порог. Основная из них — распадная параметрич. неустойчивость — появляется при выполнении распадных условий, связывающих волну накачки  $\omega_1, k_1$  с волнами малой амплитуды  $\omega_{2,1}, k_{2,1}$  (флукуационными или падающей и рассеянной). При распадной параметрич. неустойчивости, описывающей, в частности, вынужденное комбинац. рассеяние волн, проявляются такие особенности этих процессов, как экспоненциальное (а не линейное) нарастание во времени амплитуды не только рассеянной, но и падающей волн. Это является прямым следствием параметрич. положительной обратной связи рассеянной и падающей волн, распространяющихся на фоне волны накачки. При параметрич. воздействии на плазму мощных волн не только возникает неустойчивость, но и изменяются волновые (дизэлектрич.) свойства плазмы. Изменение дизэлектрич. свойств (показатель преломления) приводит к ряду эффектов самовоздействия, таких, напр., как самофокусировка и самосжатие волновых пакетов. Если под воздействием эл.-магн. волны, распространяющейся в плазме, последняя становится оптически более плотной, то это можно рассматривать как создание самим лучом некой фокусирующей линзы. Если при этом центр. часть пучка волн более интенсивна, то плазма под её воздействием имеет большую плотность, следовательно, скорость центр. пучка будет меньше и он будет несомненно отставать от периферии, и пучок волн имеет тенденцию к сходимости к центру — т. н. *самофокусировка* волн. Другим нелинейным самовоздействием волн является самосжатие волнового пакета. Оно возникает в том случае, если имеется нелинейная добавка к частоте  $\omega(\mathbf{k}, a) = \omega_0(\mathbf{k}) + \alpha a^2$  [где  $\omega_0(\mathbf{k})$  — линейная дисперсия волн,  $a$  — амплитуда волн] и групповая скорость  $v_{gr}$  зависит от волнового вектора  $\mathbf{k}$ . Тогда при  $\alpha dv_{gr}/d\mathbf{k} < 0$  возникает т. н. модуляционная неустойчивость. Если  $\alpha > 0$ , то в областях макс. амплитуд (точки  $A$  и  $A'$ , рис.) фазовая скорость больше, чем в областях мин. амплитуд (точка  $B$ ), что означает рост числа волн с приближением к области мин. амплитуд и падение его при удалении от неё, так что если групповая скорость имеет отрицат. производную по  $\mathbf{k}$ , то колебания в области  $a$  (мин. амплитуд) отстают, а в области  $b$  (макс. амплитуд) убегают вперёд, тем самым увеличивая рост максимума

амплитуд и углубляя минимум. Это и есть модуляц. неустойчивость. Модуляц. неустойчивость может приводить к т. н. коллапсу волн, когда давление накачки волн в максимуме амплитуд выталкивает частицы в области минимума амплитуд. Явление носит неадомерный характер (см. *Волновой коллапс*).



Развитие модуляционной неустойчивости.

Интересными особенностями обладают Н. я. в п., связанные с фазовой памятью частиц, напр. явление плазменного эха. Суть его состоит в следующем. Возбуждённая в к.-л. точке пространства ленгмюновская волна затухает при распространении вследствие затухания Ландау. В любой точке, где первая волна уже затухла, возбуждм на другой частоте другую волну, к-рая также затухает на опред. расстоянии. После затухания первой и второй волн через определённые пространственные интервалы можно наблюдать всплески ВЧ-колебаний на комбинац. частотах, что и наз. плазменным эхом. Появление эха можно пояснить на простом примере. Если в точке  $z = 0$  веш. источник возбуждается электрич. поле с частотой  $\omega_1 \gg \omega_0$  (напр., с помощью сетки), то это поле модулирует тепловые потоки частиц так, что ф-ция распределения электронов пропорциональна  $\delta f_1 \sim \exp[\pm i\omega_1(t - z/v)]$ . Такое распределение электронов создаёт электрич. поле лишь в районе  $z = 0$  и нуль во всём остальном пространстве. Если в точке  $z = d$  стоит аналогичная сетка, модулирующая потоки частиц с другой частотой  $\omega_2 \gg \omega_0$ , тогда  $\delta f_2 \sim \exp[\pm i\omega_2(t - (z - d)/v)]$ . Здесь также из-за быстрых осцилляций ф-ция распределения поле всюду, кроме  $z = d$ , отсутствует. Однако нелинейный отклик ф-ция распределения, который пропорционален  $\delta f_1 \delta f_2$ , даёт ненулевое поле в точке  $z = \omega_2 d / (\omega_2 - \omega_1)$ , т. к. здесь зависимость от скорости частиц в экспоненте исчезает. К Н. я. в п., связанным с частицами, промодулированными волнами, относятся также т. н. спутательная неустойчивость, возникающая на бегущих частотах волн и частотах колебаний частиц, захваченных в потенциальн. ямы волн. На основе нелинейных взаимодействий частиц и волн разработана теория слабой турбулентности плазмы (см. *Турбулентность плазм*), с помощью к-рой удалось описать явления установления спектра турбулентности, явления переноса, связанные с рассеянием на турбулентных колебаниях плазмы, рассчитать эффективные длины и времена рассеяний. Теория турбулентности плазмы используется для решения важных вопросов, связанных с нагревом и удержанием плазмы в лаб. и космич. условиях.

Лит.: Основы физики плазмы, т. 1—2, М., 1983—84. В. Н. Орленский.

**НЕЛОКАЛЬНАЯ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ** — общее наименование обобщений стандартной (локальной) квантовой теории поля, для к-рых характерно несоблюдение условия микропричинности в области малых расстояний и промежуточн. времени с размерами порядка фундаментальной длины  $l$ . (В статье используется система единиц, в к-рой  $c = \hbar = 1$ .) В большинстве вариантов Н. к. т. п. это достигается нарушением присутнего локальной теории свойства близкодействия (локальности взаимодействия), требующего совпадения пространственно-временных аргументов взаимодейств-

вующих полей; именно поэтому говорят о «нелокальной» теории поля. Н. к. т. п. смыкается с др. обобщениями локальной теории (содержащими высшие производные полей, инвариантную метрику и т. п.), а также с процедурой регуляризации УФ-расходимостей локальной теории (см. *Регуляризация расходимостей*), основанной на рассмотрении локального взаимодействия как предела «размазанного».

Н. к. т. п. зародился как реакция на расходимость, имея первоначальной целью их устранение [П. Дирак (P. A. M. Dirac), 1934; Г. Ватагин (G. V. Vataghin), 1934]. Позднее интерес к Н. к. т. п. оживился в периоды обострения трудностей локальной теории («нулевикация заряда», перенормируемость слабого взаимодействия и др.), а также при появлении свидетельств сложной внутр. структуры адронов. В более общем плане к разработкам Н. к. т. п. побуждала неудовлетворительность состоянием физ. фундамента локальной теории поля (в частности, невозможностью придать прямой физ. смысл условию микропричинности из-за неадекватности понятия точечного события в релятивистской квантовой физике); возникла даже убежденность в близости новой революции в физике, означающей коренной пересмотр представлений о пространстве-времени «в малом» и появлении новой фундам. физ. константы — элементарной (фундаментальной) длины  $l$ . Существовал и определял. практич. интерес к Н. к. т. п., связанный с ведением и планируемыми экспериментами по проверке *квантовой электродинамики* и дисперсионных соотношений (см. *Дисперсионных соотношений метод*); эта теория должна ответить на вопрос, означает ли положит. результат проверки дисперсионных соотношений подтверждение свойства микропричинности, и на др. вопросы подобного типа и дать экспериментаторам рабочие ф-лы, связывающие величину  $l$  (или её верх. границу) с данными опыта.

По степени отхода от локальной теории существующие варианты Н. к. т. п. можно разделить на два класса. К первому, «ф и в ч е с к о у», классу относятся нелокальные схемы, к-рые основаны на нестандартных пространственно-временных представлениях, дающих смысла такие понятия, как поле в определ. точке пространства-времени (или сама такая точка), локальность взаимодействия, микропричинность. Это достигается приданием 4-вектору координаты смысла оператора, компоненты к-рого не коммутируют либо с оператором поля [теория Маркова — Юкавы; М. А. Марков, 1940; Х. Юкава (H. Yukawa), 1958], либо друг с другом (теория квантованного пространства-времени; см. *Квантование пространства-времени*), что приводит к *неопределённости соотношениям* между полем и координатами точки пространства-времени и соответственно между самими этими координатами. К рассматриваемому классу относятся и др. схемы, напр. теория стохастич. пространства-времени, в которой координата имеет свойства случайной величины (а само пространство-время подобно турбулентной среде).

Второй, «ф е н о м е н о л о г и ч е с к и й», класс составляют нелокальные схемы, базирующиеся на обычных представлениях о пространстве-времени. В них нарушение локальности взаимодействия и условия микропричинности осуществляются введением в аппарат теории нек-рых заданных ф-ций координат или импульсов —  $\phi$  о р м ф а к т о р о в, к-рые и ведут к «размазыванию» взаимодействия. В динамич. моделях Н. к. т. п. ф-фактор  $F$  вводит в лагранжиан или гамилтониан взаимодействия, «раздвигая» аргументы операторов поля, отнесенных в локальной теории к единой точке пространства-времени. Так, в скалярной теории с трёхчастичным взаимодействием, к-рому отвечает ф-ция действия  $g \int d^4x \varphi^2(x)$ , переход к Н. к. т. п. осуществляется заменой этой ф-ции выражением

$$g \int d^4x d^4x' d^4x'' F(x, x', x'') \varphi(x) \varphi(x') \varphi(x'') \quad (1)$$

(здесь  $\varphi$  — скалярное поле,  $x, x', x''$  — точки пространства-времени,  $g$  — константа связи). В аксиоматич. моделях Н. к. т. п., имеющих дело только с *матрицей рассеяния*, ф-факторы вводятся в её разложение по *нормальным произведениям*, причём каждому члену такого разложения может отвечать свой ф-фактор. Нелокальные схемы 2-го класса не претендуют на описание тех изменений пространственно-временных представлений, к-рые, возможно, произойдут в будущем. Достоинство этих схем помимо простоты состоит в их общности, тем более что мн. специфич. трудности Н. к. т. п. как таковой проявляются уже на феноменологич. уровне, где их и нужно научиться преодолевать. Любой вариант Н. к. т. п. должен удовлетворять ряду общих требований: релятивистской ковариантности (внезря на существование сверхсветовых сигналов внутри области нелокальности), *калибровочной инвариантности* (для нелокальных теорий *калибровочных полей*), унитарности матрицы рассеяния на пространстве физ. состояний. Специфичны для Н. к. т. п. требования отсутствия расходимостей и м а к р о с к о п и ч е с к о й п р и ч и н н о с т и. Последнее имеет смысл «ослабленной» микропричинности, допускающей существование быстро затухающих акаузальных (причём не обусловленных) воздействий при условии, что они не наблюдаемы из-за неточности событий (актов взаимодействия между полями), т. е. иррелевантных на фоне флуктуаций, порождённых соотношениями неопределённости «координата — импульс» и «время — энергия».

Удовлетворить перечисленным требованиям при построении Н. к. т. п. оказалось нелегко, с каждым из них были связаны серьёзные трудности, возникающие при выходе за рамки локальной теории поля. Эти трудности казались столь непреодолимыми, что породили мнение о принципиальной невозможности создания последовательной Н. к. т. п. Однако спец. анализ трудностей Н. к. т. п. показал, что они не пресудят теории органически, а возникают в результате чересчур прямолинейного обобщения аппарата локальной теории. Оказалось, что эквивалентные формулировки локальной теории не равновесны с точки зрения их нелокального обобщения и преодоление трудностей Н. к. т. п. соответствовало правильному выбору исходной формулировки.

Пока нет полной уверенности лишь в выполнении требований макроскопич. причинности. Степень затухания акаузального воздействия тесно связана с аналитич. свойствами фурье-компоненты ф-фактора  $F(p)$  (где  $p$  — 4-импульс) в комплексной плоскости  $p^2$ . До кон. 1960-х гг. обсуждались лишь ф-факторы, убывающие на большом круге и имеющие особенности при конечном (но большом)  $|p^2|$ ,  $|p^2| \rightarrow -1/l^2$ ; это отвечает *обобщенным функциям*, принадлежащим к классу умеренного (полиномиального) роста. Соответствующее акаузальное воздействие затухает медленнее экспоненты  $\exp[-\text{const} \cdot |(x-x')^2|^{1/2}]$  в области  $(x-x')^2 < 0$  [в частности, на рассматриваемом классе ф-ций Н. к. т. п. совпадает с локальной теорией, если потребовать равенства нулю акаузального воздействия в области  $(x-x')^2 < -l^2$ ]. Последующее развитие Н. к. т. п. привело к расширению класса обобщенных ф-ций, что отвечало введению в рассмотрение ф-факторов в виде целых ф-ций  $p^2$ , имеющих особенности лишь на бесконечности (но убывающих в области  $p^2 < 0$ ). Одно из преимуществ таких схем состоит в более быстром затухании акаузальных воздействий. Однако до сих пор не сформулирован количественный критерий макроскопич. причинности, к-рый, будучи выражен на языке физически наблюдаемых величин (волновых пакетов), фиксировал бы допустимую форму акаузального воздействия. Это затрудняет оконч. оценку предлагающихся вариантов Н. к. т. п.

Прогресс теории фундам. взаимодействий, начавшийся на рубеже 60—70-х гг. (создание перенормируемой

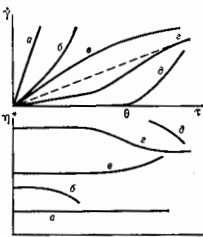
теории электрослабого взаимодействия и квантовой гидродинамики как теории сильного взаимодействия, открытие асимптотической свободы как противоположности «нуллификации заряда», появление первых моделей теории поля без УФ-расходимостей и др.), обеспечивающие многие из мотивов, побуждающих ранее к созданию Н. к. т. п. Существует точка зрения, что в относительно недалекое будущее возникнет единая теория всех взаимодействий природы, имеющая локальную основу [хотя и включающая в качестве осн. элемента протяженный объект — струну (см. *Струна релятивистская*)].

Вместе с тем считать, что с Н. к. т. п. связан лишь частый историч. интерес, преждевременен. Остаются злободневными аспекты этой теории, относящиеся к планированию и обработке результатов опытов по проверке квантовой электродинамики и дисперсионных соотношений. Ждут решения общие проблемы релятивистской теории измерения, связанные с понятиями точечного события, микропривичности и т. п. Определ. интерес к Н. к. т. п. обусловлен также трудностями квантования гравитации. Аппарат Н. к. т. п. может сделать более ясными некоторые особенности локальной перенормированной теории поля (в частности, смысл *Хааса теоремы*). Наконец, особая область применения Н. к. т. п. — феноменология. Описание сильного взаимодействия на больших расстояниях [в частности, конфайнмента (см. *Удержание цвета*): если частица (*кварк*) существует лишь в виртуальном состоянии, то *напряжения перекрестной симметрии* и, как следствие, — микропривичность. На языке феноменологии. Н. к. т. п. оказывается возможным описать единым образом большой круг фактов, относящихся к низкоэнергетич. физике сильного взаимодействия (входящая в теорию величина  $\Lambda$  играет здесь роль не элементарной длины, а феноменологич. параметра — радиуса конфайнмента).

Получить окончат. ответ на наиб. глубокие вопросы теории строения вещества (правильны ли существующие представления о пространстве-времени, локальны или не локальны фундам. взаимодействия природы и т. п.) ещё предстоит, и этот ответ придёт со стороны будущего прямого эксперимента и астрофиз. или космологич. наблюдений.

Лит.: Марков М. А., Гипероны и К-мезоны, М., 1958; е же и К., Нейтрини, М., 1964; Киржич Д. А., *Независимая квантовая теория поля*, *ЖФН*, 1966, т. 90, с. 129; Блохинцев Д. И., *Пространство и время в микромире*, 2 изд., М., 1982; Ефимов Г. В., *Проблемы квантовой теории пельоновых взаимодействий*, М., 1985. Д. А. Киржич.

**НЕОБЪЯТОНОВСКАЯ ЖИДКОСТЬ** — вязная жидкость, коэф. вязкости  $\eta$ -рой зависит от приложенного напряжения. В отличие от ньютонской жидкости (рис., а), при простом чистом сдвиге диаграмма зависи-



Кривые текучести  $\dot{\gamma}$  —  $\eta$  и зависимости эффективной вязкости  $\eta^*$  от напряжения сдвига  $\tau$ : а — диаграмма для ньютонской жидкости; б, в — диаграммы для ньютонской жидкости с к-рых  $\eta$ ; г, д — диаграммы для ньютонской жидкости, у к-рой  $\eta^*$  повышается с ростом  $\dot{\gamma}$ ; е — диаграмма для вязкопластичного тела с пределом текучести  $\theta$ .

мости скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  приложенного касат. напряжения  $\tau$  для Н. ж. нелинейна. В отличие от вязкопластич. тела, течение Н. ж. происходит при любых, в т. ч. и при достаточно малых, напряжениях. Эфф. вязкость  $\eta^* = \tau/\dot{\gamma}$  Н. ж. в отличие от эфф. вязкости ньютонской жидкости не постоянна, а в каких-то интервалах  $\tau$  и  $\dot{\gamma}$

зависит от приложенного напряжения. Эффект изменения (обычно снижения) эфф. вязкости  $\eta^*$  с ростом скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  наз. аномалией вязкости. В общем случае изотропной тензорно-линейной жидкости зависимость между девиатором напряжений  $\tau$  и скоростей деформации  $D$  записывается в виде  $\tau(D) = \varphi_1 D + \varphi_2 D^2$ , где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — скалярные ф-ции трёх кл. инвариантов тензора скоростей деформации. Для ньютонской жидкости  $\varphi_1 = 2\eta$  ( $\eta$  — коэф. вязкости),  $\varphi_2 = 0$ . В отличие от общих вязкоупругих жидкостей (вследств. сред. или сред. с памятью) поведение Н. ж. в текущий момент времени не зависит от предшествующей истории напряжённо-деформированного состояния. В этом проявляется отличие свойств Н. ж. от тиксотропных и реопексных жидкостей, у к-рых соответственно эфф. вязкость понижается или повышается в процессе механич. воздействия на систему. Свойствами Н. ж. обладают структурированные дисперсные системы (суспензии, эмульсии), растворы и расплавы некоторых полимеров, течения глин, шламов и др.

Лит.: Удлинсон У. Л., *Неньютонские жидкости*, пер. с англ., М., 1964; Рейнер М., *Реология*, пер. с англ., М., 1965; Шульцман З. П., *Беседы о реологии*, Минск, 1978; Астафитов Д. Ж., Маричичи Д. Ж., *Основы гидромеханики ньютонских жидкостей*, пер. с англ., М., 1978; Библин Е. Е., *Реология дисперсных систем*, Л., 1981.

И. И. Малинин.

**НЕОБРАТИМЫЙ ПРОЦЕСС** — физ. процесс, к-рый может самопроизвольно протекать только в одном определенном направлении. К Н. п. относятся: диффузия, теплопроводность, вязкое течение, электропроводность и др. процессы, при к-рых происходит направленный пространственный перенос вещества, энергии, импульса или заряда. Релаксац. процессы и хим. реакции также являются Н. п. Все Н. п. неравновесны. Они изучаются с макроскопич. точки зрения в *термодинамике неравновесных процессов*. Классич. термодинамика устанавливает для них лишь неравенства, к-рые указывают их возможное направление. С микроскопич. точки зрения Н. п. изучаются в *кинетике физической* методами неравновесной статистич. механики. Систему, в к-рой произошли Н. п., нельзя вернуть в исходное состояние без того, чтобы в окружающей среде не осталось к. л. изменений. В замкнутых системах Н. п. всегда сопровождаются возрастанием энтропии, что является критерием Н. п. Согласно второму началу термодинамики, изменение энтропии  $\delta S$  связано с передаваемым  $\delta Q < T\delta S$ , где  $T$  — абс. темп-ра. Возрастание энтропии системы в результате Н. п. в единицу времени и единице объема описывается локальным производством энтропии  $\sigma$ . Для Н. п. всегда  $\sigma > 0$ . В открытых системах, к-рые могут обмениваться энергией или веществом с окружающей средой, при Н. п. энтропия системы, складывающаяся из полного производства её в системе и изменения из-за вытекания (или втекания) через поверхность системы, может оставаться постоянной или даже убывать. Однако во всех случаях производство энтропии в системе остаётся положительным.

Статистич. теория Н. п. строится на основе представления о молекулярном строении вещества. Возникновение статистич. теории Н. п. связано с работами Р. Клаузиуса (R. Clausius, 1857), Л. Больцмана (L. Boltzmann, 1866), Дж. Максвелла (J. Maxwell, 1867) по кинетик. теории газов.

В общей теории Н. п. исходят из *Лиувилля уравнения* для ф-ции распределения  $f$  по координатам и импульсам всех частиц системы и для статистич. оператора  $\rho$ . Эти ур-ния обратны во времени, поэтому возникает вопрос, каким образом из обратимых ур-ний можно получить необратимые ур-ния диффузии, теплопроводности или гидродинамики вязкой жидкости. Это кажущееся противоречие можно объяснить тем, что необратимые ур-ния не являются следствием одних лишь ур-ний механики (классич. или квантовой), а требуют дополнит. предположений вероятностного ха-

рактера, к-рые можно сформулировать в виде граничных условий для  $f$  или  $r$ . При этом из двух возможных решений ур-ния Луивилля (запаздывающего и опережающего) отбрасывается лишь запаздывающее решение, к-рое соответствует возрастанию энтропии. Из ур-ния Луивилля с граничным условием можно найти неравновесный статистич. оператор. Ур-ния теплопроводности и гидродинамики вязкой жидкости получаются при усреднении ур-ний движения для плотности энергии и плотности импульса с неравновесным статистич. оператором. В этих ур-ниях коэф. теплопроводности оказываются выраженным через временные корреляц. ф-ции потоков тепла, а вязкость — через временные корреляц. ф-ции потоков импульса с помощью Грина — Кубо формул.

Лит. см. при ст. Термодинамика неравновесных процессов в Кинетика физических.

Д. Н. Зубарев.

#### НЕОБИКНОВЕННЫЙ ЛУЧ — см. Кристаллооптика.

**НЕОДИМ** (Neodimium), Nd, — хим. элемент III группы периодич. системы элементов, ат. номер 60, ат. масса 144,24, относится к лантаноидам. В природе представлен 7 изотопами с массовыми числами 142—146, 148, 150, среди к-рых преобладает  $^{142}\text{Nd}$  (27,13%) и  $^{144}\text{Nd}$  (23,80%). Изотопы  $^{144}\text{Nd}$  и  $^{145}\text{Nd}$  слабо радиоактивны, значения  $T_{1/2}$  для них равны соответственно  $2,1 \cdot 10^{15}$  и ст.  $6 \cdot 10^{16}$  лет. Электронная конфигурация внешних оболочек  $4s^2 3p^6 4f^9 5s^2 3d^6 6s^2$ . Энергии последоват. ионизации равны 5,49; 10,72; 22,1; 40,4 эВ. Металлич. радиус 0,182 нм, радиус иона  $\text{Nd}^{3+}$  0,099 нм. Значение электростриктельности 1,07.

Н. — серебристо-белый металл. При темп-рах от комнатной до 885 °C устойчив  $\alpha$ -Nd, к-рый имеет двойную гексагональную плотную упаковку с параметрами кристаллич. структуры  $a = 0,36579$  и  $c = 0,17992$  нм. При 885 °C  $\alpha$ -Nd переходит в  $\beta$ -Nd с объёмноцентриров. кубич. структурой с параметром  $a = 0,413$  нм. Плотность  $\alpha$ -Nd 7,007 г/см<sup>3</sup>,  $t_{\text{пл}} = 1024$  °C,  $t_{\text{кип}} = 3030$ —3080 °C, теплота плавления 7,15 кДж/моль, теплота испарения 274,7 кДж/моль. Коэф. теплопроводности (при темп-рах 26—30 °C) 13 Вт/(м·K), температурный коэф. линейного расширения  $6,7 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>. Уд. сопротивление  $\alpha$ -Nd  $64,3 \times 10^{-8}$  мкОм·м, температурный коэф. электр. сопротивления  $1,64 \cdot 10^{-3}$  град<sup>-1</sup>. Н. парамагнетик, магн. восприимчивость  $39,2 \cdot 10^{-6}$ . Модуль норм. упругости 38 ГПа, модуль сдвига 14,5 ГПа, предел прочности 136 МПа, твёрдость по Бринеллю 314 МПа (для Nd чистой 99%). В соединениях проявляет степень окисления +3, по хим. свойствам сходен с др. лантаноидов. Металлич. Н. применяется в металлургии как компонент шихтметалла (сплав редкоземельных элементов). Оксид  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  входит в оптич. стёкла. Н. служит активатором в лазерных материалах. В качестве радиокт. индикатора обычно используют  $\beta$ -радиоактивный  $^{147}\text{Nd}$  ( $T_{1/2} = 10,98$  сут).

С. С. Верюжова.

**НЕОДИМОВЫЙ ЛАЗЕР** — лазер, генерирующий оптич. излучение за счёт квантовых переходов между энергетич. состояниями трёхвалентных ионов  $\text{Nd}^{3+}$ , помещённых в конденсиров. среду (матрицу), напр. диэлектрич. кристаллы и стёкла, полупроводники, металлоорганич. или неорганич. жидкости. Концентрация  $\text{Nd}^{3+}$ , вводимых в матрицу, ограничена эффектом концентрации, тушения люминесценции и обычно  $\sim 1$ — $3 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. В нек-рых кристаллах и стёклах этот эффект ослаблен и концентрация  $\sim 10^{21}$  см<sup>-3</sup>. Наиб. перспективные фосфатные и силикатные стёкла (см. Лазерные стёкла), кристаллы иттрий-алюминиевого граната (ИАГ) и гадолиний-скандий-галлиевого граната (ГСГГ). Ионы  $\text{Nd}^{3+}$  — наиб. распространённые рабочие частицы твёрдотельных лазеров. Они легко активируют мп. матрицы. Накачка переводит ионы  $\text{Nd}^{3+}$  из осн. состояния  $4f_{7/2}$  в виск. относительно узких полос, играющих роль верх. уровня. Эти полосы образованы рядом перекрывающихся возбуждённых состояний, их

положения и пирины несколько меняются от матрицы к матрице. Из полос накачки осуществляется быстрая передача энергии возбуждения на метастабильный уровень  $4F_{3/2}$  (рис. 1). Возружения этого уровня составляет 0,2 мс в ИАГ и 0,7 мс в стекле. Наб. вероятность обладает лазерный переход  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$  ( $\lambda = 1,06$  мкм).

Энергетическая щель между состояниями  $4I_{11/2}$  и  $4I_{13/2}$ , равная 2000 см<sup>-1</sup>, обеспечивает четырёхуровневый характер генерации Н. л. Чем ближе к уровню  $4F_{3/2}$ , расположенные полосы поглощения, тем выше

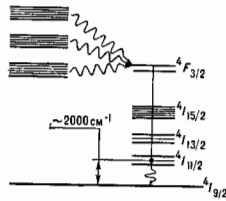


Рис. 1. Уровни энергии иона неодима.

В стёклах из-за неоднородности локальных электроств. полей линия люминесценции 1,06 мкм сильно уширена (до  $\Delta\lambda \approx 30$  нм; неоднородное уширение). В кристаллах ИАГ однородное уширение составляет примерно 0,7 нм. Сильное неоднородное уширение приводит к тому, что неодимовое стекло имеет меньшее усиление, а соответствующие лазеры — более богатую структуру, чем гранат, активированный неодимом. Вместе с тем стекло допускает большее (до 6%) введение активных центров. В литий-лантан-фосфатных стёклах допустимо почти полное замещение лития неодимом, приводящее к концентрации ионов  $\text{Nd}^{3+}$ , превышающей  $(2$ — $3) \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>. Кристаллы ИАГ активируются до концентрации 1,5% в стехиометрич. замещении иона  $\text{Y}^{3+}$  на  $\text{Nd}^{3+}$ .

Обычно область применения Н. л. на гранате и стекле существенно различны. В силу большей теплопроводности и однородности гранатовые лазеры легко работают в непрерывном и импульсно-периодич. режимах. Достигнуты ср. мощности  $\sim 10^8$  Вт. Неодимовое стекло в силу больших объёмов и более высокой концентрации активатора хорошо накапливает энергию. Поэтому именно стекло служит активной средой импульсных лазеров высокой энергии. Достигнуты значения импульсной энергии в десятки кДж.

В случаях, когда существенно высокое качество излучения, используется схема задающий генератор — усилитель мощности. В этой схеме задающим генератором является часто гранатовый лазер, а усилителем мощности (или конечным каскадом усиления мощности) — лазер на неодимовом стекле.

Н. л. работают в широком диапазоне режимов генерации, от непрерывного до существенно импульсного с длительностью, достигающей 0,5 пс. Последняя достигается методом синхронизации мод в широкой линии усиления, характерной для лазерных стёкол.

При создании Н. л. реализованы все характерные методы управления параметрами лазерного излучения, разработанные квантовой электроникой. В дополнение к т. н. свободной генерации, продолжающейся в течение практически всего времени существования импульса накачки, широкое распространение получили режимы включаемой (модулированной) добротности и синхронизации (самосинхронизации) мод.

В режиме свободной генерации длительность импульсов излучения составляет 0,1—10 мс, энергия излучения в схемах усиления мощности достигает многих кДж. Характерная длительность импульсов включаемой добротности составляет ок. 10 нс при использовании для модуляции добротности эл.-оптич. устройств. На рис. 2 приведена схема Н. л. с модулиров. добротностью. Характерная энергия лазерного генератора такого типа составляет  $\sim 1$ —2 Дж.

Дальнейшее укорочение импульсов генерации достигается применением просветляющих фильтров как

для модуляции добротности (0,1—40 нс), так и для синхронизации мод (1—10 пс). Схема лазера с самосинхронизацией мод для генерации импульсов пикосекундной длительности с помощью насыща-

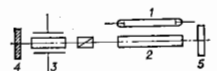


Рис. 2. Схема лазера с модуляцией добротности: 1 — синхронизирующий мод (обозначения те же, что и на рис. 2). Насыщающий фильтр 6 расположен около глухого зеркала 4.

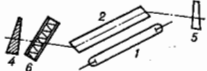


Рис. 3. Схема лазера с самосинхронизацией мод (обозначения те же, что и на рис. 2). Насыщающий фильтр 6 расположен около глухого зеркала 4.

щегося фильтра приведена на рис. 3. Для того чтобы резонатор лазера обладал только одним четким выраженным периодом межмодовых битей, грани оптич. элементов этой схемы слегка отклонены от нормали к оптич. оси резонатора, а входной и выходной торцы активного элемента расположены под углом Брюстера к этой оси. Длины волн излучения Н. л.  $\lambda = 1,8; 1,3; 1,06; 0,9$  мкм. Области применения Н. л.: технология, медицина, метеорология, дальнометрия, лазерный термометрический синтез, физ. исследование.

Лит. см. при ст. *Твердотельный лазер*. Н. В. Карлов  
**НЕОН** (Neon), Ne, — хим. элемент VIII группы периодич. системы элементов, ат. номер 10, ат. масса 20,179, относится к инертным газам. Природный Н. состоит из трёх стабильных изотопов:  $^{20}\text{Ne}$  (90,51%),  $^{21}\text{Ne}$  (0,27%) и  $^{22}\text{Ne}$  (9,22%). Атомный радиус 0,160 нм. Электронная конфигурация веш. оболочки  $2s^2p^6$ . Энергии последств. ионизации равны 21,564; 41,08; 63; 97; 126,3 эВ.

Н. — газ без цвета и запаха, состоит из одноатомных молекул. При нормальных условиях плотность 899,94 г/м<sup>3</sup>,  $t_{пл} = -248,52^\circ\text{C}$ ,  $t_{кип} = -245,93^\circ\text{C}$ . Плотность жидкого Н. (при  $t_{кип}$ ) 1,207 кг/дм<sup>3</sup>, твёрдого Н. — 1,4394—1,5073 кг/дм<sup>3</sup>. Критич. параметры: темп-ра 44,6 К, давление 2,654 МПа, плотность 484 г/дм<sup>3</sup>. Тройная точка:  $t = 27,8$  К,  $p = 31,86$  МПа. Твёрдый Н. имеет кубич. гранецентриров. кристаллич. структуру с параметром  $a = 0,44620$  нм (10 К). Темп-ра Дебая 74,6 К. Теплота плавления 335,4 Дж/моль, теплота испарения (при  $t_{кип}$ ) 1,733 кДж/моль, теплота сублимации 1,875 кДж/моль (0 К). Теплопроводность 46,8  $\times 10^{-9}$  Вт/(м·К) (0 °С), теплоёмкость 20,8 Дж/(моль·К), вязкость 31,38 мкПа·с (при нормальном давлении и 20 °С). При 25 °С в 1 л воды растворяется 11,6 см<sup>3</sup> Ne.

В хим. реакции Н. не вступает. Его применяют в газоразрядных трубах, газосветильных индикаторах и сигнальных лампах (красное свечение). Жидкий Н. применяют как хладагент в криогенной технике. Нуклид  $^{22}\text{Ne}$  использовали при осуществлении ядерных реакций с целью получения сверхтяжёлых элементов ( $\text{№ } 102, 104$  и др.).

С. С. Вердосов.  
**НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СООТНОШЕНИЯ** — фундаментальные соотношения квантовой механики, устанавливающие предел точности одноврем. определения канонически-сопряжённых динамических переменных, характеризующих квантовую систему: координата — импульс, действие — угол и т. д. Математически Н. с. имеет вид неравенства, напр.

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (1)$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta p_x$  — неопределённости значений координаты  $x$  и сопряжённой ей компоненты  $p_x$  импульса  $p$  (аналогичные соотношения справедливы и для нар др. компонент координаты и импульса:  $y, p_y; z, p_z$ ).

Н. с. были установлены В. Гейзенбергом (W. Heisenberg) в 1927 при анализе мысленного эксперимента по

измерению координаты квантового объекта с помощью «гамма-микроскопа» [1]. В 1929 Х. П. Робертсон (Н. Р. Robertson) показал, что Н. с.

$$\Delta x^2 \Delta p_x^2 \geq \left| \frac{\hat{x} \hat{p}_x - \hat{p}_x \hat{x}}{2} \right|^2 = \frac{\hbar^2}{4} \quad (2)$$

являются следствием коммутат. соотношений (см. *Перестановочные соотношения*)  $[\hat{x}, \hat{p}_x] = i\hbar$  велич. операторами  $\hat{x}$  и  $\hat{p}_x$  соответствующих физ. величин, причём  $\Delta x$  и  $\Delta p_x$  в (1) определяются как среднеквадратичные отклонения:

$$\Delta x^2 = (\hat{x} - \bar{x})^2, \quad \Delta p_x^2 = (\hat{p}_x - \bar{p}_x)^2, \quad (3)$$

где чертой обозначены средние от операторов, определяемые Ф-лой

$$\bar{A} = \int \psi^* \hat{A} \psi dV \quad (4)$$

( $\psi$  — волновая функция состояния, интегрирование производится по всему объёму, где  $\psi \neq 0$ ; звёздочкой помечено комплексное сопряжение). Он же доказал, что равенство в Н. с. достигается только для квантовых состояний,  $k$ -рые описываются т. н. гауссовыми волновыми пакетами (см. *Когерентные состояния*). Э. Шрёдингер (E. Schrödinger) предложил более общую Ф-лу в случае т. н. коррелиров. состояний [2], для  $k$ -рых

$$\Delta x^2 \Delta p_x^2 \geq \left| \frac{\hat{x} \hat{p}_x - \hat{p}_x \hat{x}}{2} \right|^2 + \left| \frac{\hat{x} \hat{p}_x + \hat{p}_x \hat{x}}{2} - \bar{x} \bar{p}_x \right|^2. \quad (5)$$

Если ввести коэф. корреляции  $r^2$ , равный отношению второго члена правой части к произведению  $\Delta x^2 \Delta p_x^2$ , то Н. с. (5) примет вид

$$\Delta x^2 \Delta p_x^2 \geq \frac{\hbar^2}{4(1-r^2)}, \quad (6)$$

т. е. для сильно коррелированных состояний ( $r \sim 1$ ) «эфф. постоянная Планка»  $\hbar\sqrt{1-r^2}$  может существенно превышать величину  $\hbar$ .

Соотношения типа (1) имеют место для любых физ. величин ( $f, g$ ),  $k$ -рым соответствует некоммутующие эрмитовы операторы. Если коммутатор  $[\hat{f}, \hat{g}] = i\hbar c$  (где  $c$  — эрмитов оператор), то Н. с. приобретают вид

$$\Delta f^2 \Delta g^2 \geq \frac{\hbar^2}{4} \left| \frac{c}{\hbar} \right|^2 \quad (7)$$

[ $\hbar$ -ый для коррелиров. состояний модифицируется аналогично (6)]. В частности, для проекций угл. момента  $[\hat{L}_x, \hat{L}_y] = i\hbar L_z$ , и поэтому  $\Delta L_x^2 \Delta L_y^2 = (\hbar^2/4) L_z^2$ .

Среди физ. толкований Н. с. можно выделить по крайней мере три уровня,  $k$ -рым в англоязычной литературе соответствуют три нар. термина: uncertainty, indeterminateness, indeterminancy. Наиб. часто, особенно в упрощённых изложениях принципов квантовой механики, Н. с. (uncertainty relations) трактуют как ограничение на экспериментально достижимую точность измерения характеристик квантовых объектов, обусловленное неадекватностью классич. приборов целям квантовых измерений.

Др. толкование (indeterminateness) исходит из предпосылки, что Н. с. есть следствие свойства квантовых объектов, внутренне присущих им, независимо от несовершенства конкретных реализаций эскерим. установок, предназначенных для измерения этих свойств. Таким внутр. свойством является *корпускулярно-волновой дуализм* квантовых объектов, т. е. неразделимое сочетание волновых и корпускулярных свойств, равно необходимых для их полного описания. С этой точки зрения, аналогии Н. с. были хорошо известны, напр. в акустике и оптике, задолго до создания квантовой механики. Так, для пучка излучения протяжённостью  $\Delta z$ , представляющего собой волновой пакет с волновыми

числения, декартами в интервале  $\Delta k$ , справедливы соотношения

$$\Delta x \cdot \Delta k \approx 1, \quad (8)$$

к-рые с учётом квантового соотношения де Бройля  $p = \hbar k$  эквивалентны Н. с. (1).

Второе толкование Н. с. значительно шире и плодотворнее первого, поскольку оно представляет собой не частное утверждение о границах уточнения характеристик квантовых объектов, а гораздо более общий принцип неопределённости. Этот принцип по существу является предпосылкой статистической интерпретации квантовой механики и важнейшим примером *дополнительности принципа Бора* (для этого расширит. толкования Н. с. часто используют термин indeterminacy). С точки зрения этого более общего принципа, Н. с. трактуются как способ сохранить классич. понятия для описания квантовых систем путём взаимного ограничения области их совместной применимости.

Н. с. для энергии  $\mathcal{E}$  и времени  $t$  по форме совпадает с (1):

$$\Delta \mathcal{E} \Delta t \approx \hbar, \quad (9)$$

однако их толкование отличается от интерпретации соотношения (1). Обычно Н. с. (9) трактуются как невозможность точного определения энергии квантовой системы ( $\Delta \mathcal{E} = 0$ ) за ограниченный интервал времени  $\Delta t$ . В качестве иллюстрации Н. с. для пары  $\mathcal{E}$  и  $t$  Н. Бор (N. Bohr) обращал внимание на невозможность определить понятие монохроматич. волны в данный момент времени.

Другая трактовка Н. с. (9) тесно связана с понятием квазистационарного состояния. В этом случае  $\Delta \mathcal{E}$  — неопределённость значения, к-рое приобретает энергия  $\mathcal{E}$ , рассматриваемая как динамическая характеристика квантовой системы, изменяющаяся во времени, а  $\Delta t$  — интервал времени, характеризующий эволюцию  $\mathcal{E}$  в интервале значений  $\Delta \mathcal{E}$ . Для возбуждённых квантовых систем (напр., атома или молекулы) неопределённость энергии состояния  $\Delta \mathcal{E}$  (естеств. ширина уровня) непосредственно связана с его временем жизни  $\tau$  с помощью Н. с. (9). (Это утверждение строго следует из теоремы Фока и Крылова [3].)

Благодаря существованию Н. с. (9) возможны виртуальные переходы, происходящие с нарушением 2-го постулата Бора, т. е. с энергиями  $\mathcal{E} \neq \mathcal{E}_{ij} = \mathcal{E}_i - \mathcal{E}_j$ , где  $\mathcal{E}_i$  и  $\mathcal{E}_j$  — энергии начального ( $i$ ) и конечного ( $j$ ) состояний квантовой системы. При этом время жизни квантовой системы  $\Delta t$  определяется из соотношения (9), в к-ром  $\Delta \mathcal{E} = |\mathcal{E} - \mathcal{E}_{ij}|$ . Виртуальные переходы могут происходить как с недостатком ( $\Delta \mathcal{E} < 0$ ), так и с избытком ( $\Delta \mathcal{E} > 0$ ) энергии  $\mathcal{E}$  по сравнению с энергией идеального перехода  $\mathcal{E}_{ij}$ , причём это имеет место как при испускании, так и при поглощении энергии квантовой системой. В частности, эта энергия может поглощаться и испускаться в виде фотонов. В этом случае виртуальное поглощение или испускание фотонов лежит в основе *многофотонных процессов* (напр., *многофотонной ионизации*) в квантовых системах.

Н. с. являются не только важной составной частью понятийного базиса квантовой механики, но они дают также способ для простых оценок количественных характеристик квантовых систем. Напр., исходя из известных размеров атома водорода,  $a = \hbar^2/mc^2$ , и соотношения (1), можно оценить характерную скорость атомного электрона в осн. состоянии:  $v \geq \Delta p/m \sim \hbar/ma \sim e^2/\hbar$ , т. е.  $v/c \sim e^2/\hbar c \approx 1/137$  ( $m$  и  $e$  — масса и заряд электрона).

Для ограниченных в объёме квантовых систем из Н. с. следует также существование энергии нулевых колебаний систем (см. *Нулевая энергия, Нулевые колебания*).

Лит.: 1) Джеммер М., Эволюция понятий квантовой механики, пер. с англ., М., 1985; 2) Додоио в В. В., Манинко В. И., Инварианты и эволюция нестационарных квантовых систем, «Группы ФИАН», 1987, т. 183; 3) Крылов Н. С.,

Фок В. А., О двух основных толкованиях соотношения неопределённости для энергии и времени, «ЖЭТФ», 1947, т. 17, с. 93; 4) Манинко В. И., Лекция по оптике, теории относительности и квантовой механике, М., 1972. Л. И. Пономарёв, НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ — совокупность приёмов и методов матем. статистики, основанных на непараметрич. представлении ф-ции распределения. Н. м. особенно эффективны в задачах анализа эксперим. данных на стадии разведочного анализа (см. *Анализ данных*), они имеют преимущество перед параметрич. методами, т. к. используют лишь непрерывные ф-ции распределения. В эксперим. физике Н. м. применяются для оценивания плотности вероятности и проверки *статистических гипотез*.

**Оценивание плотности вероятности.** Пусть имеется ряд наблюдений  $\{x_i\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ , т. е. последовательность независимых, одинаково распределённых случайных величин с неизвестной ф-цией плотности вероятности  $p(x)$ , и требуется построить непараметрич. оценку  $\hat{p}_N(x) = f_N(x_1, \dots, x_N)$  для  $p(x)$ . Обычно применяемый метод непараметрич. оценивания — построение *гистограмм*. Числовую ось, на к-рой определены  $x_i$ , делят на ряд областей  $r_j$ ,  $j = 1, \dots, K$ , а  $\hat{p}_N(x)$  задают константой  $\hat{p}_j$  в каждой области  $r_j$ , причём

$$\hat{p}_j = k(N) \sum_{i=1}^N g_i(x_i),$$

где  $k(N)$  — коэф. нормировки,  $g_j(x)$  — индикаторная ф-ция каждой области  $r_j$ :

$$g_j(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in r_j, \\ 0, & \text{если } x \notin r_j. \end{cases}$$

Тогда оценка плотности вероятности определяется выражением

$$\hat{p}_N(x) = N^{-1} \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N g_j(x_i) g_j(x).$$

Если на отрезке числовой оси, на к-ром определён ряд наблюдений  $\{x_i\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ , задать набор ортогональных ф-ций  $\{\psi_j(x)\}$ ,  $j = 1, \dots, M$ ,

$$\int dx \psi_j(x) \psi_l(x) = \delta_{jl},$$

$\delta_{jl}$  — символ Кронекера, то с помощью этого набора также можно определить непараметрич. оценку ф-ции плотности вероятности  $p(x)$ :

$$\hat{p}_N(x) = \sum_{j=1}^M C_j^N \psi_j(x),$$

где

$$C_j^N = N^{-1} \sum_{i=1}^N \psi_j(x_i).$$

Хотя эти методы довольно популярны и просты, результаты являются несостоятельными оценками, т. е. при  $N \rightarrow \infty$  они не стремятся к  $p(x)$ .

Из состоятельных Н. м. оценивания ф-ции плотности вероятности следует отметить метод ближайших соседей. Пусть имеются случайные числа  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_N$  и надо оценить их плотность вероятности в точке  $x$ . Задают целое число  $R$  ( $1 < R < N$ ) и находят такой отрезок с центром в точке  $x$ , чтобы он содержал  $R$  чисел  $x_i$ . Тогда оценкой плотности вероятности в точке  $x$  будет  $\hat{p}(x) = R/Nh$ , где  $h$  — длина найденного отрезка. В отличие от метода гистограмм, плотность вероятности здесь оценивают не по разному кол-ву случайных чисел, попавших в неперекрывающиеся отрезки фиксиров. длины, а по фиксиров. кол-ву случайных чисел, попавших в неперекрывающиеся отрезки разной длины. Ошибка оценки в этом методе

равна  $\delta \sim \hat{p}(x)/R$ , т. е. относит. ошибка  $\delta/\hat{p}(x)$  постоянна и не зависит от  $x$  (если только  $x$  не слишком близко к  $x_1$  или  $x_N$ ), в отличие от оценки по гистограмме.

**Проверка гипотез.** При параметрич. проверке гипотез предполагают, что плотность распределения  $p(x)$  является членом параметризов. семейства  $p(x|\alpha)$ . Задача состоит в том, чтобы принять или отвергнуть гипотезу, что  $\alpha$  имеет заранее известное значение, или выбрать значение из нескольких возможных значений.

При непараметрич. проверке гипотез ф-ция распределения этих гипотез не принадлежит параметрич. семейству. Для них предполагают выполненными лишь качественные свойства типа непрерывности и т. п., поэтому усложняется выбор критерия проверки гипотезы.

Обычно непараметрич. проверку гипотез используют в след. задачах: 1) имеется набор независимых случайных величин  $\{x_n\}$ ,  $n = 1, \dots, N$  с неизвестной ф-цией распределения  $F(x)$ , нужно проверить гипотезу  $H_0: F(x) = F_0(x)$ , где  $F_0(x)$  — некая заданная ф-ция распределения (задача сравнения результатов эксперимента с теоретич. моделью); 2) имеются два набора независимых случайных величин  $\{x_n\}$ ,  $n = 1, \dots, N$  и  $\{y_m\}$ ,  $m = 1, \dots, M$  с ф-циями распределения  $F(x)$  и  $G(x)$ , нужно проверить гипотезу  $H_0: F(x) = G(x)$ .

При гистограммном способе представления данных обычно используют следующие статистические критерии проверки гипотез. Пусть  $N$  случайных величин  $x_n$  сгруппированы в гистограмму с  $K$  ячейками и в ячейку с номером  $i$  попало  $n_i$  величин  $x_n$ . Согласно гипотезе  $H_0$  можно вычислить вероятность  $p_i$  попадания величин  $x$  в ячейку с номером  $i$ . В качестве проверочных статистик используют отношения правдоподобия

$$\lambda = N^N \prod_{i=1}^K (p_i/n_i)^{n_i}$$

и статистику Пирсона

$$\chi^2 = \sum_{i,j=1}^{K-1} (v_{ij} - N p_{ij}) D_{ij}^{-1} (n_{ij} - N p_{ij}),$$

где  $D_{ij}$  — ковариационная матрица для  $n_i$ . Независимо от вида  $F_0$  оказывается, что  $-2 \ln \lambda$  и  $\chi^2$  при  $N \rightarrow \infty$  распределены согласно  $\chi^2$ -распределению с числом степеней свободы  $K - 1$ . Поэтому можно вычислить критич. значения  $-2 \ln \lambda$  и  $\chi^2$  по заданной вероятности  $\alpha$  того, что при справедливости гипотезы  $H_0$  эти критич. значения могут быть превышены. Следовательно, если реализованные значения превышают критические, можно отвергнуть гипотезу  $H_0$ .

Более эффективными являются критерии, использующие в качестве проверочных статистик разл. «расстояния» между эксперим. (выборочной) ф-цией распределения  $F_N(x)$  и ф-цией  $F_0(x)$ . Выборочную ф-цию распределения определяют след. образом:

$$F_N(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1, \\ n/N, & x_1 \leq x < x_{n+1}, \\ 1, & x > x_N. \end{cases}$$

Критерий Смирнова основан на проверочной статистике

$$NW^2 = N \int dx f(x) [F_N(x) - F_0(x)]^2,$$

где  $f(x)$  — плотность ф-ции распределения  $F_0(x)$ , а критерий Колмогорова — на статистике

$$\sqrt{N} D_N = \sqrt{N} \max |F_N(x) - F_0(x)|.$$

Используют и др. критерии.

Лит.: Волькенелл Л. Н., Смирнов Н. В., Таблицы статистической статистики, 3 изд., М., 1983; Кендалл М. Стьюдент А., Статистические выводы и связи, пер. с англ., М., 1973; Статистические методы в экспериментальной физике,

пер. с англ., М., 1976; Тюрин Ю. Н., Непараметрические методы статистики, М., 1978. В. П. Игнатов, С. В. Каменко. НЕПЕР (Нп, Нр) — единица логарифмич. относит. величин (натурального логарифма отношения двух одноименных физ. величин). Названа в честь Дж. Непера (J. Napier).  $1 \text{ Нп} = \ln |F_2/F_1|$  при  $F_2/F_1 = e \approx 2,718$ , где  $F_1$  и  $F_2$  — значения электрич. напряжения, силы тока, давления и др. силовых величин. Для энергетич. величин  $1 \text{ Нп} = 0,5 \ln |P_2/P_1|$  при  $P_2/P_1 = e^2$ , где  $P_1$ ,  $P_2$  — электрич. мощность, плотность энергии и т. п. Н. применяется в осн. для измерения ослабления (затухания) электрич. сигналов в линиях связи. Ослабление силы тока на  $1 \text{ Нп}$  соответствует его уменьшению в  $e$  раз, а ослабление электрич. мощности на  $1 \text{ Нп}$  соответствует  $e^2$  уменьшению в  $e^2$  (7,39) раз.  $1 \text{ Нп} = 0,8686 \text{ бел} = 8,686 \text{ децибел}$ .

**НЕПЕРНОРИМУЕМЫЕ КВАПТОВЫЕ ТЕОРИИ**

**ПОЛЯ** — теории, в к-рых при обычных методах перенормировки (в рамках теории возмущений) количество контрольных, вводимых для компенсации расходимостей, возрастает с каждым новым порядком теории возмущений. Такие теории содержат бесконечное число неопределенных параметров, не устранимых с помощью переопределения конечного числа наблюдаемых физ. величин (таких, как заряд и масса частиц). В Н. к. т. п. существует бесконечное число разл. типов примитивно расходящихся («скелетных») фейнмановских диаграмм, тогда как в квантовой электродинамике, являющейся перенормируемой теорией, таких диаграмм только три: однопетельные графики, отвечающие собств. энергии фотона и электрона, и однопетельная поправка к трёхточечной вершинной ф-ции (см. *Фейнмановские диаграммы*). В перенормируемой квантовой гравитации каждая  $n$ -точечная гравитацион. вершина в однопетельном приближении содержит свою примитивно расходящуюся диаграмму.

Условимся называть перенормируемыми такие классы взаимодействий, к-рые при квантовании в рамках теории возмущений приводят к Н. к. т. п. Часто указанием на перенормируемость соответствующего взаимодействия является отрицательная (в единицах массы) размерность константы взаимодействия (константы связи) в системе единиц, в к-рой  $\hbar = c = 1$ , перенормируемы взаимодействия, содержащие константы связи  $\lambda \sim [M^c]$ , где  $a < 0$ ,  $M$  — величина размерности массы. Возможны исключения из этого правила, если теория содержит неск. взаимодействий и возникает сокращение расходящихся вкладов от каждого из них. Такая ситуация реализуется в нек-рых суперсимметричных теориях (см. *Суперсимметрия*). В соответствии с указанным критерием, вообще говоря, перенормируемы в четырёхмерном пространстве-времени взаимодействия скалярных полей ф типа  $\lambda \varphi^N$  при  $N \geq 5$ , четырёхфермионные взаимодействия типа  $\lambda \psi \psi \psi \psi$ , трилинейные бозон-фермионные взаимодействия с производными типа  $\lambda \bar{\psi} \gamma_\mu \psi \partial_\mu \Phi$  (где  $\psi$ ,  $\Phi$  — фермионное и бозонное поле, черта над  $\psi$  означает дираковское сопряжение;  $\partial_\mu \equiv \partial/\partial x^\mu$ ,  $\nu = 0, 1, 2, 3$ ;  $\gamma_\nu, \gamma_5$  — Дирака матрицы) и т. д. Такой вывод следует, если учесть, что в четырёхмерном пространстве-времени бозонные поля имеют (в единицах массы) размерность, равную 1, фермионные поля — размерность  $3/2$ , а сами взаимодействия (фактически во всех случаях речь идёт о плотности лагранжиана взаимодействия полей) должны иметь размерность 4. Это означает, что в рассмотренных примерах константа взаимодействия  $\lambda$  в единицах массы должна иметь отрицат. размерность.

Существует также широкий класс перенормируемых взаимодействий с безразмерной константой связи. Так, вообще говоря, перенормируемо взаимодействие массивного заряженного векторного поля с фермионами. Прогноз такого векторного поля не убывает с ростом 4-импульса, поэтому область больших импульсов в фейнмановских диаграммах не обрывается доста-



тоchio сильно; отсутствуют к тому же сокращения между разл. диаграммами (такие сокращения происходят в случае взаимодействия с нейтральным векторным бозоном), и теория оказывается перенормируемой. По аналогичной причине (увеличение пропагатора при больших импульсах), вообще говоря, перенормируемые взаимодействия для частиц со спином  $S = 1/2$  и 2. В рамках суперсимметрии перенормируемость таких взаимодействий возможна. Но даже в суперсимметричных обобщениях не видно способа добиться перенормируемости для теорий, содержащих частицы со спином  $S > 2$ .

Т. о., именно перенормируемость является наиб. общей спутательн., а класс перенормируемых взаимодействий сравнительно узок. Поэтому требование перенормируемости является чрезвычайно сильным ограничением на структуру теории.

Существуют надежды, что нек-рые варианты Н. к. т. п. благодаря высокой симметрии, содержащейся в исходном, классич. лагранжиане, могут иметь смысл вне рамок теории возмущений. Но обычно, практически во всех случаях, перенормируемость является чрезвычайно серьезным пороком теории, и распространена точка зрения, что Н. к. т. п. вообще не существуют как последовательные квантовые теории.

Тем не менее законно использование перенормируемых взаимодействий (с размерной константой связи) в феноменологии. эфф. лагранжианах (см. *Лагранжиан эффективный*). К классу таких взаимодействий относится гравитация при импульсах  $p \ll Mp \sim 10^{16}$  ГэВ, слабое взаимодействие при импульсах  $p \ll Mw \sim 300$  ГэВ, киральное взаимодействие псевдоскалярных мезонов (см. *Киральная симметрия*) при  $p \ll M_\pi \sim 1$  ГэВ (здесь  $M_\pi$  — т. п. *планковская масса*,  $Mw, M_\pi$  — массы W-бозона и  $\pi$ -мезона). Перенормируемые эфф. лагранжианы последовательно итерировать при построении ряда теории возмущений, как это происходит с обычным лагранжианом в квантовой теории поля: при больших импульсах (масштаб всегда определяется величиной обратной константы связи) эфф. лагранжиан существенно модифицируется, если теория имеет смысл; становится существенным учёт новых взаимодействий или составного характера полей в исходном перенормируемом лагранжиане. Так, перенормируемое четырехфермионное взаимодействие при  $p \sim Mw$  переходит в перенормируемое *электрослабое взаимодействие* с участием векторных бозонов и *Хиггса полей*. При  $p \sim M_\pi$  в перенормируемых киральных лагранжианах становится существенной составная, кварковая структура псевдоскалярных мезонов. Не известно, как модифицируется гравитация, взаимодействие при  $p \sim Mp$ , во в любом варианте эта модификация не играет никакой роли в классич. приложениях, эйнштейновской теории *плотности*; для к-рой характерный масштаб импульсов  $p \sim 1/(l_0^2)$  км  $\sim 10^{26}$  ГэВ.

Лит.: А. Умезер А. И., Берестетский В. Б., Квантовая электродинамика, 4 изд., М., 1981, гл. 3; Боголюбов Н. Н., Ширнов Д. В., Введение в теорию квантованных полей, 4 изд., М., 1984, гл. 5; О'уэн и Л. В., Лептоны и кварки, 2 изд., М., 1980; М. К. Волков, М. В. Ляхович, НЕПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ КВАНТОВЫЕ ТЕОРИИ ПОЛЯ — нелинейные квантовые теории поля, в к-рых лагранжиан взаимодействия имеет неполиномиальную по полям форму.

В традиции квантовой теории поля (КТП) обычно используются полиномиальные лагранжианы (т. е. представляемые в виде многочлена от ф-ций поля и их первых производных), описывающие взаимодействия полей простейшим способом с мин. числом производных. Такие лагранжианы могут приводить к перенормируемым теориям взаимодействия элементарных частиц (см. *Перенормируемость*). Наиб. типичный пример таких теорий — *квантовая электродинамика*.

К 1970-м гг. было установлено, что т. в. динамическая симметрия — киральная, калибровочная (см. *Ки-*

*ральная симметрия, Калибровочная инвариантность*) — играют важную роль в физике элементарных частиц и существенно ограничивают возможные формы их взаимодействий. Выяснилось, в частности, что простейшие полиномиальные лагранжианы не всегда удовлетворяют требованию необходимой динамической симметрии и их следует заменять на более сложные нелинейно-инвариантные выражения, если ограничиваться мин. числом интересующих нас полей [напр., если в кирально-симметричном случае сильного взаимодействия рассматривать только нуклоны и пионные поля без введения дополнит. полей (т. н. скалярных сигма-полей)]. Н. к. т. п. тем самым встали в один ряд с неполиномиальными теориями. Они успешно описывают сильное взаимодействие адронов при низких энергиях. Неполиномиальная форма взаимодействия встречается и в гравитации.

Провести строгую с физ. точки зрения границу между полиномиальными и неполиномиальными теориями иногда очень трудно. Одни и те же виды взаимодействия элементарных частиц, удовлетворяющие одной и той же динамической симметрии, могут описываться как полиномиальными, так и неполиномиальными КТП (т. н. *линейные* и *нелинейные* реализации динамической симметрии). В неполиномиальных моделях возникает трудности с устранением бесконечностей. Обычный метод перенормировки квантоволновой теории возмущений здесь неприменим, но в нек-рых вариантах Н. к. т. п. удаётся использовать спец. способы для получения однозначных результатов.

Это обстоятельство привело к тому, что в настоящее время неполиномиальные теории поля используются чаще всего лишь для построения феноменологических (или эффективных) лагранжианов (см. *Лагранжиан эффективный*). Такие лагранжианы обычно рассматриваются только в древесном (не содержащем замкнутых петель) приближении, в к-ром бесконечностей нет. Особенно широко известны феноменологии неполиномиальные киральные лагранжианы, описывающие сильное взаимодействие адронов и на достаточном простом языке воспроизводящие результаты т. н. *алгебры токов*.

В 60—70-х гг. появились направления, связанное с поисками классич. решений нелинейных и неполиномиальных ур-ний. Вместо обычного пути т. е. квантования ур-ний линейного приближения и последующего учёта нелинейных членов по теории возмущений, здесь пытаются учесть нелинейные эффекты ещё до квантования. Интересные результаты получены для нек-рых неполиномиальных *дедуричных моделей* КТП — киральных, а также модели *Синус-Гордона*, описываемой двумерным ур-нием типа *Клейна* — *Гордона уравнения*, в к-ром линейный по полю ф-ция  $\varphi(x)$  член  $m^2 c^2 \varphi(x)$  заменён на  $m^2 c^2 \sin(\varphi)$  (масса частицы,  $x$  — точка пространства-времени). Оказалось, что сред. д-р решений подобных нелинейных ур-ний важную роль играют решения, локализованные в небольшой области пространства, — т. н. солитоны. Эти решения напоминают волновые пакеты, отечающие противящимся частицам, и поэтому наз. *частицеподобными*. Т. о., нелинейные ур-ния, в отличие от линейных, в принципе могут описывать физ. частицеподобные объекты до проведения квантования. В этом направлении получены первые физ. результаты в теории поля, а именно: с помощью солитонных решений — *скирмионов*, локализованных в неполиномиальных мезонных лагранжианах кирального типа, описаны разл. физ. свойства барьонов (нуклонов и  $\Delta$ -резонансов). (См. *Солитон* в квантовой теории поля.)

Лит.: Тони в физике адронов, пер. с англ., М., 1976, гл. 5; Вольков М. К. П е р в ы й у р - н и е В. Н. С у щ е с т в е н н о н е л и н е й н ы е к в а н т о в ы е т е о р и и , д и а м и ч е с к и е с и м м е т р и и в ф и з и к е м е з о н о в , М., 1978. М. К. Волков, НЕПЕРГЫВЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД — см. в ст. *Оптические разряды*.

НЕПЕРГЫВЫЙ СПЕКТР — то же, что *сплошной спектр*.

**НЕПРОЗРАЧНОСТЬ** звёздного вещества — рассчитанный на единицу массы и усреднённый по частоте коэффициент поглощения излучения. В звёздах энергия переносится либо конвекцией (в конвективных зонах), либо излучением (в зонах лучистого равновесия). Лишь в сверхплотном веществе нейтронных звёзд и белых карликов перенос энергии обязан теплопроводности вырожденного электронного газа. Внутри звёзд интенсивность излучения почти изотропна, т. е. почти не зависит от направления его распространения. В результате плотность потока энергии излучения  $N_\nu$  на частоте  $\nu$  подчиняется закону диффузии:

$$N_\nu = -\frac{1}{3} l_\nu c \text{ grad } u_\nu, \quad (1)$$

где  $u_\nu$  — спектральная плотность лучистой энергии,  $l_\nu$  — эфф. длина свободного пробега фотонов с частотой  $\nu$ . Значение  $l_\nu$  для звёздного вещества ничтожно мало по сравнению с радиусом звезды  $R$ , и поэтому характерное время диффузии излучения в звёздах  $t_D$  очень велико по сравнению с временем  $t_C = R/c$  прохождения светом расстояния, равного  $R$ : время  $t_C$  измеряется секундами и микросекундами, а  $t_D$  — миллионами и десятками миллионов лет.

В недрах звёзд, от центра и практически до фотосферы, справедливо приближение лучистой теплопроводности, в соответствии с  $\kappa$ -крым для  $u_\nu$  в (1) используется термодинамически равновесное, определяемое законом Планка, значение  $u_\nu = (4\pi/c) B_\nu(T)$ , где  $B_\nu(T)$  — равновесная интенсивность излучения (см. Планка закон излучения). В результате

$$N_\nu = -\frac{4\pi}{3} l_\nu \frac{dB_\nu(T)}{dT} \text{ grad } T. \quad (2)$$

Рассчитанный на единицу массы коэф. поглощения  $\kappa_\nu$ , нав. также  $N$  на частоте  $\nu$ , связан с  $l_\nu$  и плотностью вещества  $\rho$  простым соотношением

$$l_\nu = (\kappa_\nu \rho)^{-1}. \quad (3)$$

Интегрируя (2) по частоте, получаем выражение для полного потока лучистой энергии  $N$ :

$$N = \int_0^\infty N_\nu d\nu = -\frac{c}{3\kappa\rho} \text{ grad } (aT^4). \quad (4)$$

Здесь  $aT^4 = \int_0^\infty u_\nu d\nu$  — полная равновесная плотность энергии излучения,  $a = 4\sigma/c$  — постоянная плотности излучения ( $\sigma$  — Стефана — Больцмана постоянная). В (4) введён средний коэф. поглощения  $\kappa$ , называемый  $N$ , и определяемый в соответствии с (2)–(4) из соотношения:

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{\int_0^\infty \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{dB_\nu}{dT} d\nu}{\int_0^\infty \frac{dB_\nu}{dT} d\nu} = \frac{15}{4\pi^4} \int_0^\infty \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx, \quad (5)$$

где  $x = h\nu/kT$ . Соответствующая ср. длина свободного пробега фотонов  $l = 1/(\kappa\rho)$ . Такой способ усреднения  $\kappa$  был указан норвежским астрономом С. Росселандом (Росселанд, S. Rosseland, 1924), и поэтому определяемое ф-лой (5) значение  $\kappa$  наз. р о с с е л а н д о в ы м с р е д н и м.

Величина  $\kappa_\nu$  определяется разл. элементарными процессами взаимодействия излучения с веществом и может быть представлена в виде:

$$\kappa_\nu = \frac{1}{\rho} \left\{ n_e \sigma_{te} + \sum_i n_i \sigma_{ai} [1 - \exp(-h\nu/kT)] \right\}. \quad (6)$$

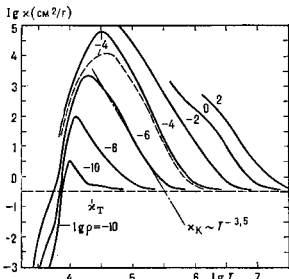
Здесь  $\sigma_{ai}$  — зависящие от частоты полные сечения истинного поглощения излучения атомами или ионами типа  $i$ ,  $n_i$  — плотности чисел этих атомов или ионов,  $\sigma_{te}$  — т. н. транс-портивное сечение рассеяния и я (см. ниже),  $n_e$  — плотность числа свободных электронов. Множитель  $[1 - \exp(-h\nu/kT)]$ , одинаковый для всех процессов поглощения, учитывает в условиях локального термодинамического равновесия эффект индуцированного испускания.

К осн. типам элементарных процессов, определяющих  $N$ , звёздного вещества, относятся следующие.

а) Фотопоглощение (связанно-свободные переходы) — пороговый процесс, в  $\kappa$ -ром участвуют только фотоны с энергией, достаточной для перехода связанного электрона в одно из свободных (несвязанных) состояний.

б) Тормозное поглощение (свободно-свободные переходы) — беспороговый процесс поглощения фотона с переходом свободного электрона в более высокое энергетич. состояние в кулоновском поле иона.

в) Поглощение в спектральных линиях (связанно-связанные переходы) — резонансный процесс поглощения фотона при переходе атома из основного или возбуждённого состояния в др. возбуждённое состояние с более высокой энергией. Сечение поглощения в центре спектральной линии обычно очень велико, но на  $N$  влияет не интенсивность линии, а её ширина. Если бы линии были очень узкими, то их вклад в  $N$  был бы незначителен, поскольку усреднения не  $\kappa_\nu$ , а его обратной величины. Присутствие интенсивных, но узких линий поглощения привело бы к «вырезанию» в интеграле (5) узких участков спектра, что практически не повлияло бы на величину интеграла. Однако в действит. «крыльях» многочисл. спектральных линий (узких резонансных стопок и эффектом Штарка), приավаляющих ионам



Зависимость непрозрачности от температуры при различных значениях плотности от  $10^{-10}$  г/см<sup>3</sup> (кр. — (2)) до  $10^4$  г/см<sup>3</sup> ( $10^9$  — 2) по расчётам А. Н. Коуса (А. N. Cox) и Дж. Н. Стюарта (J. N. Stewart) для вещества с химическим составом, близким к солнечному.

тяжёлых элементов в звёздном веществе, сечение поглощения оказывается не иррегулярно малым по сравнению с сечением фотосферного и тормозного поглощения. Расчёты показывают, что в области темп-р  $10^4 \text{ K} \lesssim T \lesssim 2 \cdot 10^6 \text{ K}$  суммарное поглощение во всех линиях может (в зависимости от величин плотности) вносить преобладающий вклад в  $N$  (рис.). При этом для каждой конкретной пары значений  $T$  и  $\rho$  приходится учитывать до неск. тысяч разл. линий поглощения.

Процессы а, б, в наз. процессами истинного поглощения. Каждое  $\sigma_{ai}$  в (6) включает все эти три вида процессов с участием атомов или ионов типа  $i$ .

г) Рассеяние излучения. Вклад процессов рассеяния в  $N$  учитывается первым слагаемым в (6),  $\kappa$ -рое выпадает для случая рассеяния излучения свободными электронами. Рассеяние молекулами и атомами может иг-

рать нек-рую роль лишь в самых наружных слоях звёзд с очень холодными атмосферами (красные гиганты и сверхгиганты, красные карлики). Величина  $\sigma_{18}$  в (6) связана с обычным полным сечением рассеяния  $\sigma_0$  соотношением

$$\sigma_{18} = \sigma_0(1 - \langle \cos \theta \rangle), \quad (7)$$

где  $\langle \cos \theta \rangle$  — усреднённый по индикатрисе рассеяния косинус угла отклонения рассеянного фотона — определяет степень анизотропии рассеяния. При энергиях фотонов, значительно меньших энергии покоя электрона ( $h\nu \ll m_0c^2$ ), т. е. при достаточно низкой темп-ре звёздного вещества, имеет место то м о с и о в с к о е р а с с е я н и е без изменения энергии фотона. В этом случае поправочный множитель на индукцию, рассеяние отсутствует, поскольку эффекты индукции, рассеяния при отклонении рассеянных фотонов от направления их движения (выход из пучка) и при повторном их рассеянии в первом, направлении (вход в пучок) взаимно компенсируются. Кроме того, индикатриса томоновского рассеяния симметрична относительно направлений вверх-назад, и поэтому  $\langle \cos \theta \rangle = 0$ . Т. о., для учёта вклада в Н. томоновского рассеяния нужно заменить  $\sigma_{18}$  в (6) на полное томоновское сечение  $\sigma_0$ , к-рое не зависит от частоты. Это справедливо для всех звёзд, принадлежащих главной последовательности на Герцишпрунга — Рассела диаграмме, в недрах к-рых осуществляется синтез гелия из водорода.

Однако в горячих и плотных центр. ядрах звёзд, закачивающих свою эволюцию, и особенно при внешних *сверхновых звёзд*, темп-ра оказывается столь высокой, что нельзя пренебречь изменением энергии фотонов при рассеянии и асимметрии индикатрисы рассеяния, к-рая уже при  $h\nu \approx 1,4 m_0c^2$  показывает заметную выгнутость вверх, и поэтому  $\langle \cos \theta \rangle > 0$ . В таких условиях сечение рассеяния описывается общей *Клейна — Нишины формулой*, а сам процесс наз. к о м и т о н о в с к и м р а с с е я н и е м. Если плотность звёздного вещества не очень велика и электронный газ невырожден, то при темп-ре (1—2)  $\cdot 10^6$  К появляется значит. число электронно-ионизированных пар, и под  $n_e$  в (6) нужно понимать суммарное число электронов и позитронов в единице объёма. Кроме того, помимо рассеяния становится существенным процесс рождения электронно-ионизированных пар при взаимодействии фотонов в основном с эл.-матг. (кулоновским) полем атомных ядер.

В совр. расчётах Н. звёздного вещества учитываются все перечисл. процессы. Эти расчёты очень сложны: они включают не только вычисления сечений отд. процессов, но и определение населённостей многочисл. возбуждённых уровней атомов и ионов с учётом разл. поправок на отклонение от идеальности звёздной плазмы. В самых наружных слоях холодных звёзд существенный вклад в Н. может внести также тормозное поглощение и фотопоглощение отрицательными ионами (H<sup>-</sup>, S<sup>-</sup> и др.), поглощение в спектральных полосах разл. молекул и поглощение частицами пыли.

На рис. показана зависимость Н. от темп-ры  $T$  и плотности  $\rho$  для смеси с хим. составом, близким к солнечному:  $X = 0,7$ ,  $Y = 0,28$ ,  $Z = 0,02$  (X, Y, Z — массовые концентрации водорода гелия и тяжёлых элементов, причём осн. вклад в Z вносит кислород, неон, углерод и азот). В большом интервале изменений  $T$  и  $\rho$  осн. источником Н. оказываются тормозное поглощение и фотопоглощение. При достаточно больших частотах сечения обоих этих процессов  $\sim 1/\nu^3$  и соответствующая им Н. может быть аппроксимирована простым выражением (приближение Крамерса):

$$\kappa = \kappa_K = C\rho/T^{3,5}, \quad (8)$$

где параметр  $C$  зависит от хим. состава вещества, а слабая зависимость  $C$  от  $T$  и  $\rho$  в первом приближении пренебрегают.

В случае преобладания томоновского рассеяния (напр., в горячих массивных звёздах верхнего конца гл. последовательности):

$$\kappa = \kappa_T = 0,2(1 + X). \quad (9)$$

Ф-лы (8) и (9) сыгнали (и продолжают играть) большую роль в исследовании внутр. строения звёзд. В совр. наиболее точных расчётах звёздных моделей используются подробные таблицы Н. как ф-ции  $T$  и хим. состава.

Для каждого фиксир.  $\rho$  при достаточно больших  $T$  Н. приближается к  $\kappa_T$  (горизонтальная штриховая линия, см. рис.), а при промежуточных значениях  $T$  и  $\rho$  хорошим приближением может служить ф-ла (8) (штрихпунктирная линия). Вклад в Н. линии поглощения продемонстрирован на рис. для плотности  $\rho = 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup> (штриховая кривая — расчёт без учёта этого эффекта). Резкое падение непрозрачности с уменьшением  $T$  при  $T < 10^4$  К связано с массовой рекомбинирующей звёздной плазмой.

Осн. вклад в рассеянодо среднее вносит фотоны с энергией  $h\nu_m$ , в нек. раз превышающей энергию теплового движения частиц звёздного вещества:  $h\nu_m \approx \approx 4kT$  в случае томоновского рассеяния и  $h\nu_m \approx 7kT$  в случае тормозного и фотопоглощения.

Лит.: Франк-Камеенецкий Д. А., Физические процессы внутри звёзд, М., 1959; Сап р о л Д. Н., The opacity at high temperatures due to Compton scattering, *Astrophys. J.*, 1959, v. 129, p. 734; Зельдович Я. В., Райзер Ю. П., Физика ударных волн и высокотемпературных явлений, 2 изд., М., 1966; Кокс А. Н., Стюарт Д. Дж., Лучистое излучение и коэффициенты проводимости 25 звёздных смесей, «Научные информации Астросвета АН СССР», 1969, v. 15, с. 1; Кокс А. Н., Коэффициенты поглощения и непрозрачность звёздного вещества, в кн.: Внутреннее строение звёзд, М., 1970; Алехандрер Д. Р., Жюльен Н. Р., Рупин А. Р. L., Effect of molecules and grains on Rosseland mean opacities, *Astrophys. J.*, 1983, v. 272, p. 773; Schlegel G. M., A., Opacities for composition plus emission and absorption, *J. Astrophys. J.*, 1984, v. 280, p. 809; Ишеник В. С. и др., Минимальная оценка среднего рассеянодо пробыта фотонов, «ЖЭТФ», 1986, т. 90, с. 1669.

Д. К. Поддешин.

**НЕПТУН** — восьмая по расстоянию от Солнца планета Солнечной системы, относящаяся к группе планет-гигантов. Н. был открыт в 1846 И. Ф. Галле (J. G. Galle) по теоретич. предсказаниям её положения, блеска и обст-ва движения, сделанным У. Ж. Лерверье (U. J. Le Verrier) и Дж. К. Адамсом (J. C. Adams) на основе законов небесной механики.

Н. обращается вокруг Солнца по орбите, находящейся на ср. геолоцентрич. расстоянии 30,058 а. е. (4497 млн. км), имеющей эксцентриситет 0,086 и наклон к плоскости эклиптики 1°46,4'. Ср. скорость движения по орбите 5,4 км/с, один полный оборот (сидерич. период обращения, или нептунианский год) составляет 164,788 земного года, экваториальный радиус Н. 24800 км (3,88  $R_{\oplus}$ ), сжатие 1:50 (0,020), объём  $V = 6,38 \cdot 10^{13}$  км<sup>3</sup> (58  $V_{\oplus}$ ), масса  $M = 1,0243 \cdot 10^{26}$  кг (17,2  $M_{\oplus}$ ). Ср. плотность 1,64 г/см<sup>3</sup>, ускорение силы тяжести на экваторе 11,238 м/с<sup>2</sup>, вторая космич. скорость 23,585 км/с. Ось вращения Н. отклонена на 29° от нормали к плоскости орбиты. Период осевого вращения, оценённый по данным спектроскопич. измерений и подтверждённый данными космич. аппарата «Вояджер-2», равен  $16,1 \pm \pm 0,08$  ч. Направление вращения прямое. Количество солнечной энергии (на ед. поверхности), поступающей к Н., составляет 1,5 Вт/м<sup>2</sup> (для Земли 1370 Вт/м<sup>2</sup>), интегральная сферич. альбедо 0,31. Эффективная темп-ра, определяемая излучаемой планетой тепловой энергией, составляет 59 К, что значительно больше равновесной (38 К), вычисленной из условия баланса с поступающей солнечной энергией. Это объясняется наличием теплового потока из недр вторе превышает поглощаемую планетой солнечную радиацию.

Макс. угл. диаметр Н. при его наблюдении с Земли достигает всего 2,4", и детали на диске разрешаются

плохо. На телевизионных изображениях, переданных «Вояджером-2», выявлена сложная структура облачно-покрова и наличие неоднородностей, обусловленных мощными дивергентными процессами в атмосфере. Наиболее характерным вихревым образованием циклонич. типа является Большое тёмное пятно в южном полушарии, по своим размерам и конфигурации напоминающее Большое красное пятно Юпитера. Наблюдается также ряд вихрей меньших размеров, дрейфующих в атмосфере с разными скоростями вдоль широты в направлении, совпадающем с направлением вращения Н.

Атмосфера Н. в целом близка по своим свойствам к хим. составу к атмосфере Урана, но гораздо более динамична. Она в основном состоит из водорода и гелия с относит. содержанием, близким к солнечному. Важной составляющей является метан, относительное содержание к-рого значительно выше, чем на Юпитере и Сатурне. Метаном обусловлен зеленоватый цвет Н., поскольку метан интенсивно поглощает солнечное излучение в красной части спектра, и в отражённом свете преобладают сине-зелёные лучи. Наблюдаемые протяжённые облака Н. в основном состоят из метана. Под ними предполагаются водо-ледяные облака, а в надоблачной атмосфере присутствуют др., более сложные углеводороды.

Низкая ср. плотность Н. свидетельствует о том, что водород и гелия много и в составе слагающего Н. вещества. Однако содержание водорода на Н. (как и на Уране) в несвязанном состоянии значительно меньше, чем на Юпитере и Сатурне. Водород на Н. в основном входит в состав т. н. ледяной компоненты, к-рой относят соединения водорода в виде метана, аммиака, воды. Большое содержание метана свидетельствует о существовании (в неск. раз) превышении отношения углерода к водороду по сравнению с их ср. космич. распространённостью. Это можно естественным образом объяснить накоплением углерода в холодных периферийных областях протопланетной туманности, из материала к-рой сформировалась Н. Согласно моделям внутр. строения планет-гигантов (см. в ст. *Планеты и спутники*), на Н. протяжённый слой твёрдого вещества состоит из смеси льдов с тяжёлой (скальной) компонентой, причём скальной компоненты несколько больше, чем ледяной. По существу это массивное ядро, к-рое окружено мантией, состоящей из смеси газов (в основном водорода и гелия) и льдов, а выше неё находится протяжённый слой водяных облаков. Здесь начинается атмосфера. Т. о., твёрдой поверхности в привычном смысле Н. не имеет (как и др. планет-гиганты). Согласно представляющейся наиб. реальной адиабатич. модели недр Н. (при допущении, что исходный состав элементов соответствует их ср. космич. распространённости, а относит. содержание водорода и гелия в несвязанной форме составляет прибл. 5—8% по массе), темп-ра в центре Н. (12—14)·10<sup>4</sup>К, а давление 7—8 Мбар. Граница протяжённой ледяной оболочки (ниже газожидкого слоя) начинается при давлении ок. 0,1 Мбар.

Недра Н., вероятно, находятся в состоянии интенсивного конвективного перемешивания. С конвекцией связан продолжающийся в современную эпоху процесс таяния из глубины и поток ИК-излучения. Его источник, видимо, сохраняется с аккреционной стадии эволюции планеты и, возможно, порождён мощными ударными процессами на её завершающем этапе. Отражением конвективного переноса являются наблюдаемые вихревые движения в атмосфере Н., в чём усматривается аналогия с Юпитером.

Н. имеет восемь спутников: к известным до полёта «Вояджера-2» Тритону и Нереиде добавилось ещё шесть. Наибольший из них представляет Тритон, к-рый принадлежит к числу самых крупных спутников планет: его радиус 1200 км (≈2/3 лунного). Тритон обращается по орбите, состоящей из плоскости экватора Н. углом 2,8°, на расстоянии 15,85 радиуса планеты с периодом 5,84 земных суток, причём в обратном направлении

(по часовой стрелке, если смотреть с северного полюса мира). Морфология поверхности Тритона, как показала изображения «Вояджера-2», имеет сложный характер, несущий на себе следы вулканог-тектонич. процессов. Не исключено, что эти процессы продолжаются в современную эпоху, свидетелями чего служат сравнительно свежие отложения извергаемого на поверхность из глубины материала. Наиболее вероятно, что таким материалом является азот. Азотные и металлические льды образуют полярные шапки, испытывающие сезонные изменения с периодом в несколько сотен лет, что обусловлено специфич. пространственным расположением Тритона относительно Солнца при совокупном орбитальном движении Тритона и Н.

Нереида — небольшой спутник, его радиус немногим более 100 км. Радиус орбиты Нереиды составляет 249,5 радиуса планеты, плоскость орбиты отклонена от плоскости экватора всего на 0,5°, движение происходит с периодом 358,4 земных суток в прямом направлении. Из вновь открытых «Вояджером-2» спутников наибольший — Протей — имеет размер 400 км, остальные — размером в десятки километров. Все они располагаются внутри орбиты Тритона. Спутники Н., по-видимому, состоят из смеси водяного, металлического и аммиачного льдов и/или соответствующих клатратгидратов. У Н. есть 3 кольца. Их особенностью является неоднородное распределение плотности (вдоль кольца) составляющего их очень тёмного материала.

Лит.: Гребенников Е. А., Рябов Ю. А., Поиски и открытия планет, 2 изд., М., 1984; Жарко В. И., Внутреннее строение Земли и планет, 2 изд., М., 1983; Мазуров М. Я., Планеты Солнечной системы, 2 изд., М., 1986; Тейффель В. Г., Уран и Нептун — далекие планеты-гиганты, М., 1982; М. Я. Маров.

**НЕПТУНИЙ** (Neptunium), Np, — искусственно полученный радиоакт. хим. элемент III группы периодич. системы элементов, ат. номер 93, относится к *актиноидам*, первый трансурановый элемент. Известны изотопы Н. с массовыми числами 227—241, наиб. устойчивый радиоактивный <sup>237</sup>Np ( $T_{1/2} = 2,14 \cdot 10^6$  лет). При образовании <sup>239</sup>Np нейтроном по (n,  $\gamma$ ) реакции образуется  $\beta$ -радиоактивный <sup>239</sup>Np ( $T_{1/2} = 2,117$  сут). Электронная конфигурация внешних оболочек 5f<sup>5</sup>d<sup>5</sup>p<sup>4</sup>5s<sup>2</sup>4f<sup>6</sup>4d<sup>7</sup>4s<sup>2</sup>. Энергия последоват. потенциалов 5,9; 11,7 и 22,0 эВ. Металлич. радиус 0,150 нм, радиусы ионов Np<sup>3+</sup> и Np<sup>4+</sup> 0,102 и 0,088 нм соответственно. Значение электроотрицательности 1,1—1,2.

В свободном виде — серебристо-белый сравнительно мягкий металл. Известны три модификации Н.:  $\alpha$ -Np (ромбич. решётка с постоянными решётки  $a = 0,473$  нм,  $b = 0,490$  нм и  $c = 0,367$  нм),  $\beta$ -Np (тетрагональная решётка с постоянными  $a = 0,490$  нм и  $c = 0,339$  нм) и  $\gamma$ -Np (объёмно-центрир. кубич. решётка с постоянной  $a = 0,353$  нм); темп-ры переходов  $\alpha \rightarrow \beta$  280°С и  $\beta \rightarrow \gamma$  577°С. Плотность  $\alpha$ -Np 20,48 г/см<sup>3</sup> (при 20°С);  $\rho_{\text{пл}} = 640^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho_{\text{кип}} = 3900 - 4100^{\circ}\text{C}$ , теплота плавления 5,61 кДж/моль, тепловороботность 7,7 Вт/м·К (при 300 К). Коэф. линейного теплового расширения  $\alpha$ -Np 4,1·10<sup>-6</sup>К<sup>-1</sup> (при 273 К).

В хим. соединениях проявляет степени окисления от +3 до +7, в водных растворах наиб. устойчива степень окисления +5. При комнатной темп-ре на воздухе металл Н. слабо реагирует с O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>, мелкодисперсный Н. способен самовозгораться. Образует сплавы с U, Pu и др. металлами. <sup>237</sup>Np используют для получения <sup>238</sup>Pu.

**НЕРАВНОВЕСНАЯ ПЛАЗМА** — плазма, состоящая к-рой не является состоянием полного термодинамич. равновесия. Примерами Н. п. могут быть: 1) в. неаио-термич. плазма, в к-рой темп-ра электронов отличается от темп-ры ионов; 2) плазма, пространственно неоднородная, в частности удерживаемая магн. полем; 3) плазма, содержащая отд. направленные потоки и пучки электронов и ионов. Как правило, неравновесность плазмы приводит к её неустойчивости, проявляющейся в саховозбуждении волн ради. тилов. См. *Низкая плазма*. Б. А. Трубицкий.

**НЕРАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ** — в термодинамике состояние системы, выведенной из состояния равновесия термодинамического, в статистич. физике — из состояния равновесия статистического; одно из основных понятий термодинамики неравновесных процессов и статистич. теории неравновесных процессов (кинетич. физическая).

В системе, находящейся в Н. с., происходит необратимые процессы переноса (теплопроводность, диффузия и т. д.), к-рые стремятся вернуть систему в состояние термодинамич. (или статистич.) равновесия, если нет препятствующих этому факторов: отвода (или подвода) энергии и вещества из системы. В противном случае возможно стремление системы не к равновесному состоянию, а к стационарному Н. с., когда *производство энтропии* в системе компенсируется её отводом из системы. Н. с., время существования к-рых очень велико, наз. *метастабильными состояниями*.

В термодинамике Н. с. определяется зависящими от времени и пространства, координат термодинамич. параметрами [темпер.  $T(x,t)$ , хим. потенциалами  $\mu_i(x,t)$  компонент, гидродинамич. скоростью  $v(x,t)$ ], соответствующими состоянию квазиравновесия в малых объемах системы. Для этих величин термодинамика неравновесных процессов позволяет получить ур-ния, определяющие перенос вещества, энергии, импульса, т. е. ур-ния диффузии, теплопроводности и ур-ния Навье — Стокса для вязкого течения жидкости.

В статистич. теории в общем случае сред. состоящих из взаимодействующих частей, Н. с. определяется зависящей от времени ф-цией распределения всех частиц по координатам и импульсам или соответствующим статистич. оператором. Однако такое определение Н. с. имеет слишком общий характер, обычно достаточно описать Н. с. менее детально, на основе огульного или т. н. сокращённого описания. Напр., для газа малой плотности достаточно знать одностатистич. ф-цию распределения по координатам и импульсам любой из частей, удовлетворяющую кинетическому уравнению Больцмана и полностью определяющую ср. значения плотностей энергий, импульса и числа частиц и их потоки. Для состояний, близких к равновесному, можно получить решение кинетич. ур-ния, зависящее от  $T(x,t)$ ,  $\mu_i(x,t)$ ,  $v(x,t)$  и их градиентов и позволяющее вывести ур-ния переноса для газа. Однако ф-ция распределения по энергиям для частиц газа в стационарном Н. с. может сильно отличаться от равновесного распределения Максвелла. Напр., для электронов в полупроводниках в сильном электрич. поле, сообщаемом электронам большую энергию, теряет смысл даже понятие темп-ры электронов, а ф-ция распределения отличается от максвелловской и сильно зависит от приложенного поля.

В общем случае для состояний, близких к равновесному, можно найти реакцию системы на возмущение, вызванное внеш. приложенным полем (механич. возмущение), к-рая определяется запаздывающими Грина функциями в статистической физике. Если Н. с. обусловлено внутр. неоднородностями в системе, напр. неоднородностями темп-ры, хим. потенциала, гидродинамич. скорости (тепмч. возмущения), то можно найти поправки к равновесной ф-ции распределения, зависящие от времени лишь через  $T(x,t)$ ,  $\mu_i(x,t)$ ,  $v(x,t)$  и их градиенты. Это позволяет получить систему ур-ний переноса с кинетич. коэф., определяемыми Грина — Кубо формулами через временные корреляц. ф-ции потоков.

Д. И. Зубарев.

**НЕРАВНОВЕСНОЕ ТЕЧЕНИЕ** — течение гомогенной или гетерогенной смеси, в к-рой происходит неравновесные физ.-хим. процессы. К числу наиб. часто встречающихся неравновесных процессов относятся неравновесное возбуждение внутр. степеней свободы молекул, неравновесное протекание реакции диссоциации, рекомбинации и ионизации, неравновесная конденсация или испарение, неравновесное движение и теплообмен жидкостями или твёрдыми частями в газе и т. д. Н. т. имеет место,

когда время физ.-хим. процесса сравнимо с характерным газодинамич. временем.

Н. т. наблюдается при обтекании тел, течениях в струях и соплах, особенно при околосонных и сверхзвуковых скоростях. Напр., хим. реакции в соплах реактивных двигателей протекают неравновесно, поскольку характерное время реакции сравнимо с временем прохождения объема газа через сопло.

Предельными случаями Н. т. являются равновесное и замороженное. В равновесном течении характерное время физ.-хим. процесса много меньше характерного газодинамич. времени, т. е. принимается, что физ.-хим. процессы происходят мгновенно. В замороженном течении, наоборот, время протекания физ.-хим. процесса много больше характерного газодинамич. времени, т. е. за характерное время перемещения объема среды химической реакции или физического превращения не успевают совершиться.

При равновесном течении термодинамич. и газодинамич. параметры определяются с привлечением соотношений термодинамики равновесных процессов. Так, концентрации реагирующих компонент в таких течениях определяются из закона действующих масс, энергия колебат. степеней свободы вычисляется по ф-ле Эйнштейна, парциальные давления конденсирующихся компонент — по Клапейрона — Клаузиуса уравнению, а скорости и темп-ра частиц, присутствующих в газе, принимаются равными скорости и темп-ре газа.

В замороженном течении сохраняются неизменными молярные доли хим. компонент, энергия колебат. степеней свободы, скорости и темп-ры частиц, а процессы конденсации и кристаллизации не происходят.

Н. т. является неизоэнтропическим, а отличие от изоэнтропических равновесного и замороженного течений. Отмеченные выше неравновесные процессы проявляются при высокоскоростных и высокотемпературных течениях газа в соплах реактивных двигателей и аэродинамич. труб, соплах газодинамич. и хим. лазеров, соплах МГД-генераторов, в двигателях внутр. сгорания. Газодинамич. и термодинамич. параметры при Н. т., как правило, являются промежуточными между параметрами равновесного и замороженного течения. Характерный пример Н. т. — течение в соплах при неравновесном протекании хим. реакций. В этом случае из-за того, что хим. энергия в Н. т. выделяется не полностью и частично не передается в активные степени свободы и энергию поступат. движения молекул, темп-ра, скорости, давление и поток импульса в Н. т. меньше, чем в равновесном (но больше, чем в замороженном). Наиб. отличие наблюдается в темп-ре и давлении (иногда на десятки процентов), значительно меньше в скорости и потоке импульса. Плотность смеси слабо зависит от характера протекания процесса. Аналогичное поведение параметров наблюдается и при протекании др. неравновесных процессов в соплах.

Для матем. описания Н. т. используется система дифференц. ур-ний газовой динамики, к-рая дополняется т. н. релаксационными (кинетическими) ур-ниями, описывающими исследуемый неравновесный процесс. Так, для описания течений с неравновесными хим. реакциями используются ур-ния хим. кинетики с соответствующей системой реакций и констант скоростей реакций; для течений с колебат. релаксацией — ур-ния для нахождения энергии разл. возбуждённых колебат. мод с соответствующими временами релаксации; для течений с неравновесной конденсацией — ур-ния нуклеации и ур-ния роста зародышей (ф-лы Максвелла или Кнудсена); для двухфазных течений с жидкостями или твёрдыми частями — ур-ния движения и теплообмена частиц с соответствующими коэф. сопротивления и теплообмена. Лит.: Термодинамич. и теплофизич. свойства продуктов сгорания. Справочник, т. 1—10, М., 1971; Пиррумов У. Г., Росляков Г. С., Течение газа в соплах, М., 1978.

У. Г. Пиррумов.  
**НЕРАВНОВЕСНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ** — переходы многофазных систем, находящихся вдали от

термодинамик, равновесия, в стационарные состояния с пространств, или временной когерентностью. Н. ф. п. связаны с потерей устойчивости исходного бесструктурного состояния, являющегося актралоподобной равновесного состояния в неравновесные условия, и происходят в результате бифуркаций, приводящих к возникновению новых стационарных состояний. Подобные явления имеют место в открытых системах и обусловлены флуктуациями, индуцируемыми внеш. воздействием.

Пример Н. ф. п. — возникновение лазерной генерации. С термодинамик. точки зрения лазер представляет собой неравновесную систему, т. к. она включает в себя атомы и поле, к-рые связаны с резервуарами, имеющими разл. темп-ры. При слабой накачке активные атомы излучают независимо друг от друга. С увеличением накачки лазер переходит в когерентное состояние, в к-ром все атомы излучают в фазе. При этом обнаруживается аналогия с фазовыми переходами 2-го рода. Подобная аналогия имеет место при Н. ф. п. и в др. системах: физических (образование конвективных ячеек Бенара; возникновение осцилляций напряженности электрич. поля в диоде Ганна), химических (появление автоколебаний и автоволн при хим. реакциях), биологических (переход в режим ритмич. активности нейтронов ансамблей; образование неоднородных структур при морфогенезе) и т. д. Рассмотрение этих явлений в рамках единого подхода, использующего Ландау теорию фазовых переходов и теорию нелинейных колебаний и волн, составляет основу синергетики.

При описании Н. ф. п. выделяют самые неустойчивые (критич.) стенины свободы. При развитии этих мод и последующей их стабилизации в процессе взаимодействия между собой образуется пространственная или временная структура. Нелинейные у-рия для амплитуд этих возмущений (параметров порядка) получаются после исключения из динамик. у-рий всех остальных мод. В простейшем случае одномодового лазера для зависящей от времени комплексной амплитуды поля излучения  $\varphi$  получим:

$$\partial\varphi/\partial t = a\varphi - 2b|\varphi|^2\varphi + F(t), \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  — параметры, характеризующие излучение,  $F(t)$  — случайная сила, обусловленная флуктуациями. При  $a < 0$  можно пренебречь обусловленной диссипацией нелинейностью. В этом случае значение амплитуды  $\varphi$  полностью определяется шумом  $F(t)$ . Изменение знака линейного по  $\varphi$  слагаемого в (1) приводит к потере устойчивости нулевого (в отсутствие флуктуаций) решения и к появлению нетривиальных устойчивых решений с  $|\varphi|^2 = a/2b$ , т. е. к возникновению когерентного лазерного излучения, к-рое лишь в незначит. степени нарушается флуктуациями. Т. о., в поведении лазерного излучения при переходе через порог генерации, как и в обычных фазовых переходах 2-го рода, имеет место неустойчивость, приводящая к спонтанному нарушению симметрии. Вид стационарного распределения вероятности может зависеть от интенсивности флуктуаций. Напр., в случае т. н. мультипликативного шума, приводящего к появлению в у-рии (1) слагаемого  $g(\varphi)F(t)$ , где  $g(\varphi)$  — век-рая ф-ция амплитуды  $\varphi$ , стационарное распределение имеет вид:

$$W(\varphi) \sim g^{-1}(\varphi) \exp \{ \Gamma^{-1} \int d\varphi' \varphi' (a - 2b|\varphi'|^2) g^2(\varphi') \}.$$

При этом возможна ситуация, когда при малых  $G$  вероятности имеет один максимум, а при век-рой критич. интенсивности шума  $G_c$  появляются два максимума. Поэтому при  $G > G_c$  система с наиб. вероятностью находится в стационарном состоянии, соответствующем одному из двух максимумов распределения  $W(\varphi)$ . Расщепление максимума возникает в результате конкуренции между диссипацией, удерживающей систему в стационарном состоянии, не зависящей от шума, и диффузией, к-рая выводит систему из этого состояния. Если считать интенсивность внеш. флуктуаций управляющим

параметром, а возникающее расщепление параметром порядка, то подобное явление представляет собой стимулированный шумом Н. ф. п.

Иза-за флуктуаций можно говорить лишь о вероятности разл. значений  $\varphi$ . Стационарное распределение является решением Фоккера — Планка уравнения [к к-рому можно свести у-рие (1)] и записывается в виде

$$W \sim \exp(-E|\varphi|/\Gamma).$$

Здесь  $2\Gamma$  — ср. интенсивность случайной силы, а эфф. функционал энергии равен

$$E|\varphi| = \frac{1}{2}(-a|\varphi|^2 + b|\varphi|^4). \quad (2)$$

Это разложение по  $\varphi$  соответствует функции  $\varphi$  в  $L$  и  $\Gamma$  в  $L$  в б у р г а — Л а н д а у для равновесных фазовых переходов 2-го рода.

Расматриваемую модель можно обобщить на бесконечное число мод с непрерывно распределёнными в пространстве параметрами. При этом зависимость коррел. радиуса флуктуаций поля от степени близости параметров к пороговому значению соответствует температурной зависимости радиуса коррелляции при обычных фазовых переходах 2-го рода. Распределение вероятности  $\varphi$  имеет тот же вид, а эфф. энергия совпадает по форме с функционалом Гинзбурга — Ландау для комплексного параметра порядка в феноменол. теории сверхпроводимости.

В случае конвекции Бенара диссипативная нелинейность функционала энергии обусловлена температурной зависимостью вязкости, к-рая приводит к резонансной связи между тремя гидродинамич. модами с одинаковыми по модулю и развёрнутыми на  $60^\circ$  волновыми векторами. Стационарная конвекция характеризуется одинаковыми амплитудами этих мод, что приводит к образованию конвективной пространств. структуры из гексагональных призматич. ячеек.

В отличие от обычных фазовых переходов, где стабилизация параметра порядка обусловлена увеличением энергии из-за взаимодействия флуктуаций (ведиссипативной нелинейностью), в Н. ф. п. стабилизирующее действие оказывает нелинейная диссипация. Поэтому для поддержания стационарного состояния система должна быть открытой, т. к. необходим постоянный приток энергии от внеш. источника.

Известны вещества, где велики одновременно как диссипативные, так и ведиссипативные нелинейности. Это сегнетоэлектрич. или ядкие кристаллы с примесями из оптич. активных атомов, монов или молекул, в к-рых существенно взаимное влияние равновесных и неравновесных фазовых переходов. Так, когерентное излучение способно индуцировать обычное упорядочение, и наоборот, обычный фазовый переход приводит к понижению порога генерации и уменьшению длины волны излучения.

Интересны обычные фазовые переходы в случаях, когда упорядочивающая система связана с неравновесной подсистемой, возбуждаемой извне. Напр., в полупроводниках с магн. или сегнетоэлектрич. свойствами фото возбуждение электронной подсистемы способно не только изменить темп-ру и род фазового перехода, но и перевести его в качественно новый автоколебательный или автоволновой режим.

Примером Н. ф. п. 1-го рода является образование электроно-дырочной жидкости в полупроводниках. Она образуется в виде капель, окружённых газом свободных носителей, когда концентрация носителей, возбуждаемых внеш. воздействием, превышает нек-рое критич. значение.

Н. ф. п. возможны также в нелинейных системах, для к-рых характерна, напр., оптич. бистабильность. Переклещение между двумя неравновесными состояниями также аналогично равновесному фазовому переходу 1-го рода.

Лит.: Хакеи Г., Синергетики, пер. с англ., М., 1980; Клеймонтич Ю. Д., Квантовая теория электромагнитных процессов, М., 1980. Г. В. Тейтельбаум.

**НЕРАВНОВЕСНЫЙ ПРОЦЕСС** в термодинамике и статистической физике — физ. процесс, включающий неравновесные состояния. Пример: процесс установления равновесия (термодинамич. или статистич.) в изолир. системе, находящейся в неравновесном состоянии. Если в такой системе существуют неоднородное поле темп-р, градиенты концентрации и скоростей упорядоченного движения частиц, то вызванные ими Н. п. теплопроводности, диффузии, вязкого течения способствуют устранению различий свойств в разных частях системы и установлению равновесия. В неизолир. системах Н. п. могут протекать стационарно (без изменений физ. состояния системы, пример — теплопередача за счёт теплопроводности при пост. разности темп-р). Н. п. являются необратимым процессом, связанным с производством энтропии.

Д. Н. Зубарев.

**НЕПРАЗВНОСТИ УРАВНЕНИЕ** в гидромеханике — выражает закон сохранения массы для движущейся жидкости (газа). В переменных Эйлера (см. Эйлера уравнения гидромеханики) Н. у. имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0,$$

п в случае несжимаемой жидкости ( $\rho = \text{const}$ )

$$\text{div} \mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0,$$

где  $t$  — время,  $x, y, z$  — координаты жидкой частицы;  $v_x, v_y, v_z$  — проекции её скорости  $\mathbf{v}$ ;  $\rho$  — плотность. Для одномерного течения вдоль оси (течение в струе, канале, трубе, сопле и т. п. с площадью поперечного сечения  $S$ ) Н. у. принимает вид

$$\frac{\partial(\rho S v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho S v^2)}{\partial x} = 0.$$

При установившемся течении это ур-ние даёт  $\rho S v = \text{const}$ , т. е. закон постоянства расхода.

Н. у. в переменных Лагранжа см. Лагранжа уравнения гидромеханики.

**ПЕРВЫЙ ЯМПУЛЬС** — волна возбуждения, к-рая распространяется по нервному волокну и служит для передачи информации от перифер. рецепторных (чувствительных) окончаний к нервным центрам, внутри центр. нервной системы и от неё к исполнительным аппаратам — мышцам и железам. Прохождение Н. п. сопровождается переходными электрич. процессами, к-рые можно зарегистрировать как внеклеточными, так и внутриклеточными электродами.

Генерацию, передачу и переработку Н. п. осуществляет нервная система. Осн. структурным элементом нервной системы высших организмов является нервная клетка, или нейрон, состоящий из тела клетки и многочисл. отростков — дендритов и аксона (рис. 1). Один из отростков у перифер. нейронов имеет большую длину — это нервное волокно, или аксон, протяжённость к-рого  $\sim 1$  м, а толщина от 0,5 до 30 мкм. Различают два класса нервных волокон: мякотные (миелинизированные) и безмякотные. У мякотных волокон имеется миелиновая оболочка, образованная спец. мембраной, к-рая подобно изоляции накручивается на аксон. Протяжённость участков сплошной миелиновой оболочки составляет от 200 мкм до 1 мм, они прерываются т. н. перекрестами Ранье в ширину 1 мкм. Миелиновая оболочка играет роль изоляции; нервное волокно на этих участках пассивно, электрически активна только мембрана в перекрестах Ранье. Безмякотные волокна не имеют изолир. участков; их структура однородна по всей длине, а мембрана обладает электрич. активностью по всей поверхности.

Нервные волокна заканчиваются на телах или дендритах др. нервных клеток, но отделины от них порож-

жетком шириной  $\sim 10$  нм. Эта область контакта двух клеток назв. синапсом. Входящая в синапс мембрана аксона назв. пресинаптической, а соответствующая мембрана дендрита или мышцы — постсинаптической (см. Клеточные структуры).

В нормальных условиях по нервному волокну постоянно бегут серии Н. п., возникающих на дендритах или теле клетки и распространяющихся по аксону в направлении от тела клетки (аксон может проводить Н. п. в обоих направлениях). Частота этих периодич. разрядов несёт информацию о силе вызвавшего их раздражения; напр., при умеренной активности частота  $\sim 50$ –100 импульсов/с. Сущность клеток, к-рые разряжаются с частотой  $\sim 1500$  импульсов/с.

Скорость распространения Н. п.  $v$  зависит от типа нервного волокна и его диаметра  $d$ ,  $v \sim d^{1/2}$ . В тонких волокнах нервной системы человека  $v \sim 1$  м/с, а в толстых волокнах  $v \sim 100$ –120 м/с.

Каждый Н. п. возникает в результате раздражения тела нервной клетки или нервного волокна. Н. п. всегда имеет один и те же характеристики (форму и скорость) независимо от силы раздражения, т. е. при подпороговом раздражении Н. п. не возникает совсем, а при надпороговом — имеет полную амплитуду.

После возбуждения наступает рефракторный период, в течение к-рого возбудимость нервного волокна снижена. Различают абс. рефракторный период, когда волокну нельзя возбудить никаким раздражителем, и относ. рефракторный период, когда возбуждение возможно, но его порог оказывается выше нормы. Абс. рефракторный период ограничивает сверху частоту передачи Н. п. Нервное волокно обладает свойством accommodation, т. е. привыкает к постоянно действующему раздражению, что выражается в постепенном повышении порога возбудимости. Это приводит к снижению частоты Н. п. и даже к их полному исчезновению. Если сила раздражения нарастает медленно, то возбуждения может не произойти даже после достижения порога.

Вдоль нервного волокна Н. п. распространяется в виде волны электрич. потенциала. В синапсе происходит смена механизма распространения. Когда Н. п. достигает пресинапч. окончания, в синапс, щель выделяется активное хим. вещество — медиатор. Медиатор диффундирует через синапс, щель и меняет проницаемость постсинапч. мембраны, в результате чего на ней возникает потенциал, вновь генерирующий распространяющийся импульс. Так действует хим. синапс. Встречается также электрич. синапс, когда след. нейрон возбуждается электрически.

**Возбуждение Н. п.** Физ. представления о появлении электрич. потенциалов в клетках основаны на т. н. мембранной теории. Клеточные мембраны разделяют растворы электролитов разной концентрации и обладают избират. проницаемостью для нек-рых ионов. Так, мембрана аксона представляет собой тонкий слой липидов и белков толщиной  $\sim 7$  нм. Её электрич. сопротивление в состоянии покоя  $\sim 0,1$  Ом·м<sup>2</sup>, а ёмкость  $\sim 10$  мФ/м<sup>2</sup>. Внутри аксона высока концентрация ионов  $K^+$  и мала концентрация ионов  $Na^+$  и  $Cl^-$ , а в окружающей среде — наоборот.

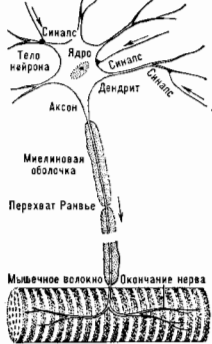


Рис. 1. Схема строения нервной клетки.

В состоянии покоя мембрана аксона проницаема для ионов  $K^+$ . Из-за разницы концентраций  $C_K^o$  во внеш. и  $C_K^i$  во внутр. растворах на мембране устанавливается калиевый мембранный потенциал

$$\varphi_K = (kT/e) \ln(C_K^o/C_K^i),$$

где  $T$  — абс. темп-ра,  $e$  — заряд электрона. На мембране аксона действительно наблюдается потенциал покоя  $\sim -60$  мВ, соответствующий указанной ф-ле.

Ионы  $Na^+$  и  $Cl^-$  проникают через мембрану. Для поддержания необходимого неравновесного распределения ионов клетка использует систему активного транспорта, на работу к-рой расходуется клеточная энергия. Поэтому состояние покоя нервного волокна не является термодинамически равновесным. Оно стационарно благодаря действию ионных насосов, причём мембранный потенциал в условиях разомкнутой цепи определяется из равенства нулю полного электрич. тока.

Процесс первого возбуждения развивается следующим образом (см. также Биофизика). Если пропустить через аксон слабый импульс тока, приводящий к денатурации

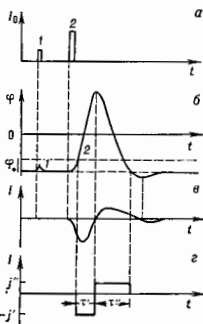


Рис. 2. Развитие потенциала действия в нервном волокне: а — подпороговое (1) и надпороговое (2) возбуждения; б — мембранный отклик; в — надпороговое возбуждение; г — полный потенциал действия; д — ионный ток, протекающий через мембрану при возбуждении; е — аппроксимация ионного тока в процентной аналитической модели.

мембраны, то после снятия внеш. воздействия потенциал монотонно возвращается к исходному уровню. В этих условиях аксон ведёт себя как пассивная электрич. цепь, состоящая из конденсатора и пост. сопротивления.

Если импульс тока превышает нек-рую пороговую величину, потенциал продолжает изменяться и после выключения возмущения; потенциал становится положительным и только потом возвращается к уровню покоя, причём вначале даже несколько проскакивает его (область гиперполяризации, рис. 2). Отклик мембраны при этом не зависит от возмущения; этот импульс наз. *пост. и в а л о м д е й с т в и я*. Одновременно через мембрану течёт ионный ток, направленный сначала внутрь, а потом наружу (рис. 2, *д*).

Феноменологич. истолкование механизма возникновения Н. и. было дано А. Л. Ходжкином (A. L. Hodgkin) и А. Ф. Хаксли (A. F. Huxley) в 1952. Полный ионный ток складается из трёх составляющих: калиевого, натриевого и тока утечки. Когда потенциал мембраны сдвигается на пороговую величину  $\varphi_*$  ( $\sim 20$  мВ), мембрана становится проницаемой для ионов  $Na^+$ . Ионы  $Na^+$  устремляются внутрь волокна, сдвигая мембранный потенциал, пока он не достигнет величины равновесного натриевого потенциала:

$$\varphi_{Na} = (kT/e) \ln(C_{Na}^o/C_{Na}^i),$$

составляющего  $\sim 60$  мВ. Поэтому полная амплитуда потенциала действия достигает  $\sim 120$  мВ. К моменту достижения макс. потенциала в мембране начинает развиваться калиевая (и одновременно уменьшаться натриевая) проводимость. В результате натриевый ток сме-

няется на калиевый, направленный наружу. Этот ток соответствует уменьшению потенциала действия.

Установлены эмпирич. ур-ния для описания натриевого и калиевого токов. Поведение мембранного потенциала при пространственно однородном возбуждении волокна определяется ур-нием:

$$C \Delta \varphi / dt = -I, \quad (1)$$

где  $C$  — ёмкость мембраны,  $I$  — ионный ток, складывающийся из калиевого, натриевого и тока утечки. Эти токи определяются пост. эдс  $\varphi_{Na}$ ,  $\varphi_{K}$  и  $\varphi_l$  и проводимостями  $g_K$ ,  $g_{Na}$  и  $g_l$ :

$$I = g_{Na}(\varphi - \varphi_{Na}) + g_K(\varphi - \varphi_K) + g_l(\varphi - \varphi_l). \quad (2)$$

Величину  $g_l$  считают постоянной, проводимости  $g_{Na}$  и  $g_K$  описываются с помощью параметров  $m$ ,  $h$  и  $n$ :

$$g_{Na} = \bar{g}_{Na} m^3 h, \quad g_K = \bar{g}_K n^4, \quad (3)$$

$\bar{g}_{Na}$ ,  $\bar{g}_K$  — постоянные; параметры  $m$ ,  $h$  и  $n$  удовлетворяют линейным ур-ниям

$$\begin{aligned} dm/dt &= \alpha_m(1-m) - \beta_m m, \\ dh/dt &= \alpha_h(1-h) - \beta_h h, \\ dn/dt &= \alpha_n(1-n) - \beta_n n. \end{aligned} \quad (4)$$

Зависимость коэф.  $\alpha$  и  $\beta$  от мембранного потенциала  $\varphi$  (рис. 3) выбирают из условия наилучшего совпадения

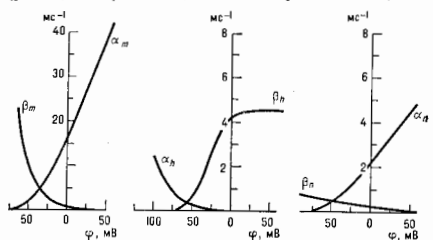


Рис. 3. Зависимость коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  от мембранного потенциала.

расчётных и измеряемых кривых  $I(t)$ . Этими же соображениями вызван выбор параметров. Зависимость стационарных значений  $m$ ,  $h$  и  $n$  от мембранного потенциала приведена на рис. 4. Существуют модели с большим числом параметров. Т. о., мембрана нервного волокна представляет собой нелинейный ионный проводник, свойства к-рого существенно зависят от электрич. поля. Механизм генерации возбуждения изучен плохо. Ур-ния Ходжкина — Хаксли дают лишь удачное эмпирич. описание явления, за к-рым нет конкретной физ. модели. Поэтому важной задачей является изучение механизмов протекания электрич. тока через мембраны, в частности через управляемые электр. поля ионные каналы.

Распространение Н. и. П. и. может распространяться вдоль волокна без затухания и с пост. скоростью. Это связано с тем, что необходимая для передачи сигнала энергия не поступает из единого центра, а черпается на месте, в каждой точке волокна. В соответствии с двумя типами волокон существуют два способа передачи Н. и.: непрерывный и скачкотворный (скачкообразный), когда импульс движется от одного перехвата Ранье к

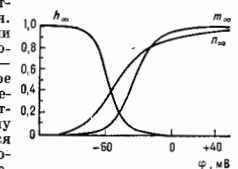


Рис. 4. Зависимость стационарных значений  $m$ ,  $h$  и  $n$  от мембранного потенциала.



другому, перепрыгивая через области миелиновой изоляции.

В случае демиелинизации волокон распределение мембранного потенциала  $\phi(x, t)$  определяется уравнением:

$$C d\phi/dt = R^{-1} \partial^2 \phi / \partial x^2 - I, \quad (5)$$

где  $C$  — ёмкость мембраны, приходящаяся на единицу длины волокна,  $R$  — сумма продольных (внутриклеточного и внеклеточного) сопротивлений на единицу длины волокна,  $I$  — поперечный ток, протекающий через мембрану волокна единичной длины. Электрический ток  $I$  является функцией от потенциала  $\phi$ , к-рый зависит от времени  $t$  и координаты  $x$ . Эта зависимость определяется уравнениями (2)–(4).

Вид функционала  $I$  специфичен для биологической возбудимой среды. Однако уравнение (5), если отвлечься от вида  $I$ , имеет более общий характер и описывает многие физ. явления, напр. процесс горения. Поэтому передача Н. и. упрощают горению порохового шнура. Если в бегущем пламени процесс поджигания осуществляется за счёт теплопроводности, то в Н. и. возбуждение происходит при помощи т. н. локальных токов (рис. 5).



Рис. 5. Локальные токи, обеспечивающие распространение нервного импульса.

Ур-ния Ходжкина — Хаксли для распространения Н. и. решались численно. Полученные решения вместе с накопленными эксперим. данными показали, что распространение Н. и. не зависит от деталей процесса возбуждения. Качество картину распространения Н. и. можно получить при помощи простых моделей, отражающих лишь общие свойства возбуждения. Такой подход позволил рассчитывать скорость и форму Н. и. в однородном волокне, их изменение при наличии неоднородности и даже сложные режимы распространения возбуждения в активных средах, напр. в сердечной мышце. Существует неск. матем. моделей подобного рода. Простейшая из них такова. Ионный ток, протекающий через мембрану при прохождении Н. и., является знакопеременным: вначале он течёт внутри волокна, а потом наружу. Поэтому его можно аппроксимировать кусочно-постоянной ф-цией (рис. 2, з). Возбуждение происходит, когда мембранный потенциал сдвигается на пороговую величину  $\phi_0$ . В этот момент возникает ток, направленный внутрь волокна и равный по модулю  $j'$ . Спустя время  $t'$  ток меняется на противоположный, равный  $j''$ . Эта фаза продолжается в течение времени  $\sim t''$ . Автоматическое решение ур-ния (5) можно найти как ф-цию переменной  $t = x/v$ , где  $v$  — скорость распространения Н. и. (рис. 2, б).

В реальных волокнах время  $t'$  достаточно велико, поэтому только оно определяет скорость  $v$ , для к-рой справедлива ф-ла:  $v = (j'/\phi_0 RC^2)^{1/2}$ . Учитывая, что  $j' \sim \sim d$ ,  $R \sim d^2$  и  $C \sim d$ , где  $d$  — диаметр волокна, находим в согласии с экспериментом, что  $v \sim d^{1/2}$ . С помощью кусочно-постоянной аппроксимации находят форму потенциала действия.

Ур-ние (5) для распространяющегося Н. и. в действительности допускает два решения. Второе решение оказывается неустойчивым; оно даёт Н. и. со значительно меньшей скоростью и амплитудой потенциала. Наличие второго, неустойчивого, решения имеет аналогию в теории горения. При распространении пламени с боковым теплоотводом также возможно возникновение неустойчивого режима. Простую аналитич. модель Н. и. можно усовершенствовать, учитывая дополнит. детали.

При изменении сечения и при ветвлении нервных волокон прохождении Н. и. может быть затруднено или даже полностью блокировано. В расширяющемся волокне (рис. 6) скорость импульса по мере приближения к расширению убывает, а после расширения начинает расти, пока не выйдет на новое стационарное значение. Замедление Н. и. тем сильнее, чем больше разница в сечениях. При достаточно большом расширении Н. и. останавливается. Существует критич. расширение волокна, к-рое задерживает Н. и.

При обратном движении Н. и. (из широкого волокна в узкое) блокирование не происходит, но изменение скорости носит противоположный характер. При подходе к сужению скорость Н. и. увеличивается, а затем начинает падать до нового стационарного значения. На графике скорости (рис. 6а) получается своего рода петли гистерезиса.

Другой тип неоднородности — ветвление волокон. В узле ветвления возможны разл. варианты прохождения и блокирования импульсов. При несинхронном под-



Рис. 6. Прохождение нервных импульсов по расширяющемуся волокну: а — изменение скорости импульса в зависимости от его направления; б — схематическое изображение расширяющегося волокна.

ходе Н. и. условие блокирования зависит от временного сдвига. Если временной сдвиг между импульсами мал, то они помогают друг другу проникнуть в широкое третье волокно. Если сдвиг достаточно велик, то Н. и. мешают друг другу. Связано это с тем, что Н. и., подошедший первым, но не сумевший возбудить третье волокно, частично переводит узел в рефракторное состояние. Кроме того, возникает эффект синхронизации: по мере приближения Н. и. к узлу их запаздывание друг относительно друга уменьшается.

Взаимодействие Н. и. Нервные волокна в организме объединены в лучки или нервные стволы, образующие подобие многожильного кабеля. Все волокна в лучке представляют собой самостоят. линии связи, но имеют один общий «провод» — межклеточную жидкость. Когда по любому из волокон бежит Н. и., он создаёт в межклеточной жидкости электрич. поле, к-рое влияет на мембранный потенциал соседних волокон. Обычно такое влияние пренебрежимо мало и линии связи работают без взаимных помех, но оно проявляется в патологич. и искусств. условиях. Обработывая нервные стволы спец. хим. веществами, удаётся наблюдать не только взаимные помехи, но и передачу возбуждения в соседние волокна.

Известны эксперименты по взаимодействию двух нервных волокон, помещённых в ограниченный объём внеш. раствора. Если по одному из волокон бежит Н. и., то одновременно изменяется возбудимость второго волокна. Изменение происходит три стадии. Вначале возбудимость второго волокна падает (повышается порог возбуждения). Это уменьшение возбудимости опережает потенциал действия, бегущий по первому волокну, и длится примерно до тех пор, пока потенциал в первом волокне не достигнет максимума. Затем возбудимость растёт, эта стадия совпадает по времени с процессом уменьшения потенциала в первом волокне. Возбудимость ещё раз уменьшается, когда в первом волокне происходит небольшая гиперполяризация мембраны.

При одноврем. прохождении Н. и. по двум волокнам иногда удавалось достигнуть их синхронизации. Несмотря на то что собств. скорости Н. и. в разных воло-

нак различны, при их одноврем. возбуждении мог возникнуть коллективный Н. и. Если скорост. свойства были одинаковы, то коллективный импульс имел меньшую скорост. При заметном отличии скорост. свойств коллективная скорост. имела промежуточное значение. Синхронизоваться могли лишь Н. и., скорост. к-рых отличались не слишком сильно.

Матем. описание этого явления даётся системой ур-ний для мембранных потенциалов двух параллельных волокон  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ :

$$C_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{R_1 + R_2}{\gamma} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} - \frac{R_2}{\gamma} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} - I_1, \quad (6)$$

$$C_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -\frac{R_2}{\gamma} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} + \frac{R_1 + R_2}{\gamma} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} - I_2,$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — продольные сопротивления первого и второго волокон,  $R_3$  — продольное сопротивление внешней среды,  $\gamma = R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3$ . Ионные токи  $I_1$  и  $I_2$  можно описать той или иной моделью первого возбуждения.

При использовании простой аналитич. модели решение приводит к след. картине. Когда возбуждается одно волокно, в соседнем наводится знакопеременный мембранный потенциал: вначале волокно гиперполяризуется, затем деполаризуется и, наконец, ещё раз гиперполяризуется. Эти три фазы соответствуют понижению, повышению и новому понижению возбудимости волокна. При нормальных значениях параметров сдвиг мембранного потенциала во второй фазе в сторону деполаризации не достигает порога, поэтому передачи возбуждения в соседнее волокно не происходит. При одноврем. возбуждении двух волокон система (6) допускает совместное автомодельное решение, к-рое соответствует двум Н. и., движущимся с одинаковой скоростью по мат. расстоянию друг от друга. Если впереди находится медленный Н. и., то он притормаживает быстрый импульс, не выпуская его вперёд; оба движутся с относительной малой скоростью. Если же впереди находится быстрый Н. и., то он подтягивает за собой медленный импульс. Коллективная скорост. оказывается близкой к скорост. скорост. быстрого импульса. В сложных нейронных структурах возможно появление автоволн.

**Возбудимые среды.** Нервные клетки в организме объединены в нейронные сети, к-рые в зависимости от частоты ветвления волокон разделяют на редкие и густые. В редкой сети отд. элементы возбуждаются независимо друг от друга и взаимодействуют только в узлах ветвления, как описано выше.

В густой сети возбуждение охватывает сразу много элементов, так что их детальная структура и способ соединения между собой оказываются несущественными. Сеть ведёт себя как непрерывная возбудимая среда, параметры к-рой определяют возникновение и распространение возбуждения.

Возбудимая среда может быть трёхмерной, хотя чаще её рассматривают как двумерную поверхность. Возбуждение, возникшее в к.-л. точке поверхности, распространяется во все стороны в виде колцевой волны. Волна возбуждения может обогнуть препятствия, но не может от них отражаться, не отражается она и от границы среды. При столкновении волн между собой происходит их взаимное уничтожение; проити друг сквозь друга эти волны не могут из-за наличия позади фронта возбуждения рефракторной области.

Примером возбудимой среды является сердечный нервно-мышечный синцитий — объединение нервных и мышечных волокон в единую проводящую систему, способную передавать возбуждение в любом направлении. Нервно-мышечные синцитии сокращаются синхронно, подчиняясь волне возбуждения, к-рую посылает единый управляющий центр — водитель ритма. Единый ритм иногда нарушается, возникает аритмия. Один из таких режимов наз. трепетанием предсердий: это автономные сокращения, вызванные циркуляцией возбуждения вокруг препятствия,

напр. верхней или нижней вены. Для возникновения подобного режима периметр препятствия должен превышать длину волны возбуждения, равную в предсердии человека ~ 5 см. При трепетании происходит периодич. сокращение предсердий с частотой 3—5 Гц. Более сложный режим возбуждения представляет собой фибрилляция желудочков сердца, когда отд. элементы сердечной мышцы начинают сокращаться без внеш. команды и без связи с соседними элементами с частотой ~ 10 Гц. Фибрилляция приводит к прекращению циркуляции крови.

Возникновение и поддержание спонтанной активности возбудимой среды неразрывно связаны с возникновением источников волн. Простейший источник волн (группа спонтанно возбуждающихся клеток) может обеспечить периодич. нульсвой активности, так устроен водитель ритма сердца.

Источники возбуждения могут возникать и за счёт сложной пространств. организации режима возбуждения, напр. ревербератор типа вращающейся спиральной волны, появляющийся в простейшей возбудимой среде. Другой вид ревербератора возникает в среде, состоящей из элементов двух типов с разными порогом возбуждения: ревербератор периодически возбуждает то один, то другие элементы, меняя при этом направление своего движения и порождая плоские волны.

Третий вид источника — ведущий центр (источник эха), к-рый появляется в среде, неоднородной по рефракторности или порогу возбуждения. В этом случае на неоднородности возникает отражённая волна (эхо). Наличие подобных источников волн приводит к появлению сложных режимов возбуждения, исследуемых в теории автоволн.

Лит.: Холмстедт А., Нервный импульс, пер. с англ., М., 1965; Иваниц В., Нерв, мышца и синяк, пер. с англ., М., 1968; Холдоров В. И., Проблема возбудимости, Л., 1969; Тасакан И., Первое возбуждение, пер. с англ., М., 1971; Марцин В. С., Пастушев И. В., О Чидзавже в Ю. А., Теория возбудимых сред, М., 1981. В. С. Марцин.

**НЕРНСТА ТЕОРЕМА** — то же, что *Третье начало термодинамики*.

**НЕРНСТА ЭФФЕКТ** (продольный гальванотермомagnetный эффект) — появление в проводнике, по к-рому течёт ток  $I$ , находящемся в магн. поле  $H$ , градиента темп-ры  $\nabla T$ , направленного вдоль тока  $I$ ; градиент темп-ры не меняет знак при изменении направления поля  $H$  на обратное (чётный эффект). Открыт В. Г. Нернстом (W. N. Nernst) в 1888. Н. э. возникает в результате того, что перенос тепла (поток носителей заряда) сопровождается потоком тепла. Фактически Н. э. представляет собой *Пельтье эффект* в условиях, когда возникающая на концах образца разность темп-ры приводит к компенсации потока тепла, связанного с током  $I$ , потоком тепла за счёт теплопроводности. Н. э. наблюдается также и в отсутствие магн. поля.

**НЕРНСТА—ЭТТИНГСАУЗЕНА ЭФФЕКТ** — явление электрич. поля  $E_{\perp}$  в проводнике, в к-ром есть градиент темп-ры  $\nabla T$ , в направлении, перпендикулярном магн. полю  $H$ . Различают поперечный и продольный эффекты.

Поперечный Н.—Э. э. состоит в появлении электрич. поля  $E_{\perp}$  (разности потенциалов  $V_{\perp}$ ) в направлении, перпендикулярном  $H$  и  $\nabla T$ . В отсутствие магн. поля термоэлектрич. поле компенсирует поток носителей заряда, создаваемый градиентом темп-ры, причём компенсация имеет место лишь для полного тока: электроны с энергией, большей средней (горячие), движутся от горячего конца образца к холодному, электроны с энергией, меньшей средней (холодные), — в противоположном направлении. Сила Лоренца, отклоняет эти группы носителей в направлении, перпендикулярном  $\nabla T$  и магн. полю, в разные стороны; угол отклонения (угол Холла) определяется временем релаксации  $\tau$  данной группы носителей, т. е. различается для горячих и холодных носителей, если  $\tau$  зависит от энергии. При этом ток холодных и горячих носителей в поперечном направле-

нии ( $\nabla T$  и  $\nabla n$ ) не могут компенсировать друг друга. Это приводит к появлению поля  $E_{\text{на}}^1$ , величина которого определяется из условия равенства 0 суммарного тока  $j = 0$ .

Величина поля  $E_{\text{на}}^1$  зависит от  $\nabla T$ ,  $N$  и свойств вещества, характеризующихся коэф. Нернста—Эттингсауэна  $N_1$ :

$$E_{\text{на}}^1 = N_1 \nabla T$$

В полупроводниках под действием  $\nabla T$  носители заряда разных знаков движутся в одну сторону, а в магн. поле отклоняются в противоположные стороны. В результате направление поля Нернста—Эттингсауэна, создаваемого зарядами разного знака, не зависит от знака носителей. Это существенно отличает поперечный Н.—Э. э. от Холла эффекта, где направление поля Холла различно для зарядов разного знака.

Т. к. коэф.  $N_1$  определяется зависимостью времени  $\tau$  релаксации носителей от их энергии  $\mathcal{E}$ , то Н.—Э. э. чувствителен к механизму рассеяния носителей заряда. Рассеяние носителей заряда уменьшает влияние магн. поля. Если  $\tau \sim \mathcal{E}^r$ , то при  $r > 0$  горячие носители рассеиваются реже холодных и направление поля  $E_{\text{на}}^1$  определяется направлением отклонения в магн. поле горячих носителей. При  $r < 0$  направление  $E_{\text{на}}^1$  противоположно и определяется холодными носителями.

В металлах, где ток переносится электронами с энергией в интервале  $\sim kT$  вблизи Ферми поверхности, величина  $N_1$  задается производной  $\partial \tau / \partial \mathcal{E}$  на Ферми-поверхности  $\mathcal{E}_F = \text{const}$  (обычно у металлов  $N_1 > 0$ , но, напр., у меди  $N_1 < 0$ ).

Измерения Н.—Э. э. в полупроводниках позволяют определить  $r$ , т. е. восстановить  $\tau$ -функцию ( $\mathcal{E}$ ). Обычно при высоких темп-рах в области собств. проводимости полупроводника  $N_1 < 0$  из-за рассеяния носителей в оптич. фононах. При понижении темп-ры возникает область с  $N_1 > 0$ , соответствующая примесной проводимости и рассеянию носителей гл. обр. на фононах ( $r < 0$ ). При ещё более низких  $T$  доминирует рассеяние на ионизов. примесях с  $N_1 < 0$  ( $r > 0$ ).

В слабых магн. полях ( $\omega \tau \ll 1$ , где  $\omega = \text{циклотронная частота носителей}$ )  $N_1$  не зависит от  $H$ . В сильных полях ( $\omega \tau \gg 1$ ) коэф.  $N_1$  пропорц.  $1/H^2$ . В анизотропных проводниках коэф.  $N_1$  — тензор. На величину  $N_1$  влияют увеличение электронов фотонами (увеличивает  $N_1$ ), анизотропия Ферми-поверхности и др.

Продольный Н.—Э. э. состоит в возникновении электрич. поля  $E_{\text{на}}^1$  (разности потенциалов  $V_{\text{на}}^1$ ) вдоль  $\nabla T$  при наличии  $H \perp \nabla T$ . Т. к. вдоль  $\nabla T$  существует термоэлектрич. поле  $E^x = \alpha \nabla T$ , где  $\alpha$  — коэф. термоэлектрич. поля, то возникновению дополнит. поля вдоль  $\nabla T$  равносильно изменению поля  $E^x$  при паложении магн. поля:

$$E_{\text{на}}^1 = E^x(H) - E^x(0) = N_1 \alpha H^2 \nabla T,$$

$$N_1 = \frac{\alpha(H) - \alpha(0)}{\alpha(0)H^2} = \frac{1}{H^2} \frac{\Delta \alpha}{\alpha(0)}.$$

Магн. поле, искривляя траектории электронов (см. выше), уменьшает их длину свободного пробега  $l$  в направлении  $\nabla T$ . Т. к. время свободного пробега (время релаксации  $\tau$ ) зависит от энергии электронов  $\mathcal{E}$ , то уменьшение  $l$  неодинаково для горячих и холодных носителей: оно меньше для той группы, для которой  $\tau$  меньше. Т. о., магн. поле меняет роль быстрых и медленных носителей в переносе энергии, и термоэлектрич. поле, обеспечивающее отсутствие переноса заряда при переносе энергии, должно измениться. При этом коэф.  $N_1$  также зависит от механизма рассеяния носителей. Термоэлектрич. ток растёт, если  $\tau$  падает с ростом энергии носителей  $\mathcal{E}$  (при рассеянии носителей на акустич. фононах), или уменьшается, если  $\tau$  увеличивается

с увеличением  $\mathcal{E}$  (при рассеянии на примесях). Если электроны с разными энергиями имеют одинаковое  $\tau$ , эффект исчезает ( $N_1 = 0$ ). Поэтому в металлах, где диапазон энергий электронов, участвующих в процессах переноса, мал ( $\sim kT$ ),  $N_1$  мало:  $N_1 \sim kT / \mathcal{E}_F \ll 1$ . В полупроводнике с двумя сортами носителей  $N_1 \sim \sim \mathcal{E}_p / kT$ . При низких темп-рах  $N_1$  может также возрастать из-за влияния увлечения электронов фононами. В сильных магн. полях полное термоэлектрич. поле в магн. поле «насыщается» и не зависит от механизма рассеяния носителей. В ферромагн. металлах Н.—Э. э. имеет особенности, связанные с наличием спонтанной намагниченности.

Лит.: Дана и др. Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Цидильковский и И. М., Термомагнитные явления в полупроводниках, М., 1969; Ковалевский Е. И., К теории явления Нернста—Эттингсауэна у ферромагнитных металлов, «ЖЭТФ», 1963, т. 45, с. 510; Киреев П. С., Физика полупроводников, 2 изд., М., 1975. М. С. Бреслер.

**НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗЯД** — электрич. ток в газах, существующий при заданной разности потенциалов лишь при наличии внеш. ионизатора (см. *Электрические разряды в газах*).

**НЕСОЗЕРМАЯ МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА** (неоизмерная структура; др. названия: витовая, спиральная, геликоидальная, длиннопериодическая, модулированная) — тип магн. упорядочения в кристаллах, при к-ром периоды магн. упорядочения хотя бы в одном направлении несоизмеримы с периодами кристаллич. решётки. Существование Н. м. с. связано с тем, что значения магн. периодов зависят от внеш. условий (темп-ры, давления и др.) и пробегают при изменении этих условий нек-рый непрерывный интервал значений как несоизмеримых, так и соизмеримых с периодами кристаллич. решётки (описание магн. структур, в т. ч. и Н. м. с., на языке волновых векторов  $k$  дано в ст. *Магнитная атомная структура*).

Причины возникновения Н. м. с. разл. типов состоят в конкуренции взаимодействий, стремящихся установить разл. соизмеримые магн. структуры (напр., ферромагнитные и антиферромагнитные). В частности, в металлах, магнетиках это находит своё выражение в спиральных структурах, обусловленных осциллирующим РККИ-обменным взаимодействием; в магнетиках с локализованными магн. моментами спиральная магн. структура часто реализуется в результате конкуренции обменных взаимодействий разных знаков между ближайшими и вторыми соседями (т. н. обменная спираль); встречаются и более сложные случаи обменно-релятивистских спиралей.

Типичное эксперим. проявление Н. м. с. — наличие на магн. нейтрограмме пары (или дес. пар) равноотстоящих слабых пиков-сателлитов, обрамляющих структурный брэгговский пик (см. *Магнитная нейтронография*). Расстояние же до сателлитов на нейтрограмме непосредственно связано с величиной магн. периода. В общем случае волновой вектор Н. м. с. можно представить в виде  $k = k_0 + \delta k$ , где  $|k_0| = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  — целое число,  $\alpha$  — постоянная решётки). Величина  $k_0$  определяет центр группы сателлитов, а  $\delta k$  зависит от темп-ры и является мерой удалённости сателлитов от центра.

Лит.: Дана и др. Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Изаюмов Ю. А., Дифракция нейтронов на длиннопериодических структурах, 1987. В. Е. Наум.

**НЕСОЗЕРМАЯ СТРУКТУРА** — суперпозиция нек-р. периодич. структур, в к-рой хотя бы одно из отстоящих периодов разл. составляющих  $\lambda$  непрерывно зависит от внеш. условий, напр. темп-ры  $T$ . При непрерывном изменении  $T$  эта величина может «пробегать» иррациональные значения. Н. с. широко распространены в природе. Это нек-рые сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, интеркалированные соединения графита, адсорб. моносл., несоизмерные магнитные структуры и др.

Н. с. можно описывать как пространства, модулирующие (заamorоженную волну) нек-рого параметра, напр.

магн. момента (синоусоидальные и теликоидальные магнитные структуры); плотности спинов (см. *Спиновая плотность волны*); плотности электрич. заряда (см. *Волны зарядовой плотности*); степени упорядочения в шихлах (периодич. структуры антифазных доменов); смещений ионов относительно их положений в исходной фазе; угла наклона молекул в слое смектик. *жидкого кристалла* (крупные смектики) и т. п.

При иррациональном отношении периода «замороженной волны» к периоду осн. структуры термодинамич. потенциал системы не меняется при сдвиге «замороженной волны» как целого (изменением её фазы). Это означает, что Н. с. относится к вырожденным системам, энергия к-рых не меняется при однородном по объёму изменении век-рой фазы.

Одно из проявлений вырожденности Н. с. — наличие в ней наряду с обычными акустич. фононными ветвями (см. *Колесания кристаллической решётки*) дополнит. акустич. ветвей (от 1 до 3) с частотой  $\omega$ , обращаясь в 0 при стремлении к 0 волнового вектора  $K$ . Такие возбуждения наз. *фазонами*. В отличие от акустич. фазона частота длинноволнового фазона меньше коэф. затухания и возбуждение носит не колебательный, а релаксационный характер. Это объясняется тем, что даже при сдвиге «замороженной волны», переводящем кристалл в энергетически эквивалентное состояние, происходят смещения атомов в Н. с. друг относительно друга и, следовательно, при конечной скорости этого сдвига имеет место диссипация энергии. Наличие фазона проявляется при неупругом рассеянии излучений, а также в особенностях спи-решёточной релаксации.

Др. важным следствием вырожденности Н. с. является влияние на их свойства дефектов кристалла. Если энергия дефекта зависит от параметра, модуляция к-рого описывает Н. с., дефект фиксирует фазу «замороженной волны» в точке своей локализации. В результате при конечной концентрации случайно расположенных дефектов Н. с. искажается. При этом дальний порядок в Н. с. отсутствует, т. е. дифракц. максимумы, отвечающие «замороженной волне», должны иметь конечную ширину даже в бесконечном кристалле. Это — результат того, что возмущения, зносимые в Н. с. дефектом, медленно спадают по мере удаления от дефекта ( $\sim r^{-1}$ ).

Рассмотрим изолированный неподвижный дефект в Н. с. Смещение «замороженной волны» как целого связано для такой системы с приращением в энергии, т. е. «волна» не находится больше в безразличном равновесии. Возникает захват «волны». Др. словами, фазон перестаёт быть возбуждением с частотой  $\omega \rightarrow 0$  при  $K \rightarrow 0$ , т. е. в спектре фазона возникает энергетич. щель. Сказанное справедливо для  $T = OK$ . Т. к. фаза «волны» определена неоднозначно, изменение её локального значения на  $2\pi n$  ( $n$  — целое число) не изменяет энергии дефекта. Т. о., дефект закрепляет «волну» не вполне жёстко: допускаются скачкообразные её перемещения относительно дефекта с переходом через энергетич. барьер. При  $T > 0 K$  такие перемещения возможны в результате термоактивиз. процесса при сколь угодно слабой силе, стремящейся сместить волну, т. е. щель для фазона, строго говоря, отсутствует. В системе с конечной концентрацией дефектов Н. с. имеет множество метастабильных состояний. Поэтому приближение к равновесию в Н. с. с дефектами обладает особенностями, характерными для *стекла*, в частности, имеет место долговрем. релаксация, не описываемая простыми экспоненциальными зависимостями от времени.

Долговрем. релаксация проявляется в гистерезисе, напр. для температурной зависимости периода волны  $\lambda$  (в единицах постоянной решётки осн. структуры). Наблюдаются две разл. зависимости  $\lambda(T)$  для нагрева и охлаждения. Это означает, что в обоих случаях наблюдаются неравновесные структуры. Если фиксировать  $T$  в течение долгого времени (иногда сотни ч), то  $\lambda$  приближается к равновесному значению, промежуточному между значениями, соответствующими нагре-

ванию и охлаждению. Релаксация  $\lambda$  отличается от экспоненциальной. Если после нек-рого охлаждения кристалла начать нагревание, то  $\lambda$  остаётся постоянным до тех пор, пока не будет достигнута кривая нагрева, и затем  $\lambda$  изменяется в соответствии с этой кривой (аналогично при переходе от нагрева к охлаждению). Это означает, что заметное изменение периода Н. с.  $\lambda$  происходит только при конечной величине перегрева или переохлаждения. При переходе от охлаждения кристалла к нагреву  $\lambda$  начинает изменяться лишь с нек-рой величины перегрева.

Возможны также др. эффекты в Н. с., связанные с диффузией дефектов. При длит. выдержке кристалла при данном  $T$  дефекты перераспределяются, собираясь в наиб. энергетически выгодных участках «волны». «Замороженная волна» дефектов может затем долгое время сохраняться в кристалле, и момент прохождения той тем-ры, при к-рой происходило формирование этой «волны», отмечается по особенностям в температурной зависимости разл. величин.

Кроме взаимодействия «волны» с дефектами кристалла структура Н. с. в большой мере определяется взаимодействием «волны» с осн. структурой. В трёхмерных системах благодаря этому взаимодействию Н. с. в строгом смысле слова не существуют даже в идеальном кристалле. Можно показать, что при иррациональном отношении  $\lambda$  периода «замороженной волны» к периоду осн. структуры система обладает большим термодинамич. потенциалом, чем при любом рациональном значении  $\lambda$ , бесконечно близком к данному иррациональному. Поэтому при данной  $T$  существует бесконечное кол-во устойчивых фаз с разл. (рациональными) значениями  $\lambda$ . При изменении  $T$  равновесная система должна испытать бесконечное число фазовых переходов между этими со-размерными ( $C$ ) структурами. В большинстве случаев, однако, скачки разл. величин, напр. теплоёмкости, при таких переходах оказываются столь малыми, что свойства системы неотличимы от свойств Н. с. В двумерных системах влияние осн. структуры ослаблено из-за тепловых флуктуаций (роль к-рых возрастает при переходе к системам меньшей размерности). При конечной  $T$  устойчивыми оказываются только со-размерные фазы с не очень большим отношением периодов. На фазовой диаграмме с ними граничат особые Н. с. с «квазиидальными порядком», когда соответствующие корреляц. функции обнаруживают не простое осцилляц. поведение (как для периодич. структуры), а с амплитудой осцилляций, убывающей с расстоянием по степенному закону.

В большинстве случаев Н. с. наблюдаются как промежуточная фаза, расположенная на фазовой диаграмме между двумя со-размерными фазами, причём группы симметрии этих фаз связаны соотношением группа — под-группа. Более симметричную фазу наз. обычно нормальной (Н), менее симметричную — со-размерной (С). Характер Н. с. претерпевает заметную эволюцию при изменении внеш. параметров. Наиб. типичным является случай, когда близки тем-ры перехода из Н-фазы ( $T = = T_1$ ) распределение соответствующего параметра в «замороженной волне» имеет синоусоидальный характер. При удалении от  $T_1$  увеличивается вклад высших гармоник в пространств. распределение этого параметра и Н. с. становится похожей на периодич. структуру до-мёнов С-фазы (говорят также о периодич. решётке *солитонов*, обозначая термином *солитон* границу доменов). При приближении к переходу в С-фазу ( $T = T_2$ ) расстояние между солитонами увеличивается. Если оно стремится к бесконечности, происходит непрерывный переход в С-фазу. В большинстве случаев, однако, переход в С-фазу носит скачкообразный характер.

Для описания свойств Н. с. близки  $T_2$  полезна след. картина её образования. Рассмотрим доменную границу в С-фазе. При определённых условиях её энергия может изменить знак, став отрицательной. В системе начнётся размыкание доменных границ, их равновесная

концентрация будет определяться конкурентной между собой энергией границ и энергией их взаимодействия. Если это взаимодействие носит характер отталкивания для всех расстояний между границами, то при переходе в область, где энергия границ отрицательна, их концентрация изменяется непрерывно, возрастает от нулевого значения. Если же имеет место притяжение между границами, то концентрация границ скачкообразно увеличивается до конечной величины.

Частным случаем Н. с. является решётка вихрей в сверхпроводнике второго рода. Пространственно неоднородные структуры, характер которых определяется граничными условиями (напр., доменная структура в пластине сегнетоэлектрика или ферромагнетика), обычно не относятся к Н. с., подбирая тем самым, что период и др. характеристики последних определяются параметрами вещества, а не его геометрией.

Дан.: Л. в. и а. у. Л. Д., Л. П. Ф. и ц. Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982, § 52; С. Р. у. к. в. Б. А., Л. в. и а. у. К. П., Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах, М., 1983; Брус А., Каули Р., Структурные фазовые переходы, пер. с англ., М., 1984; И. в. з. м. Ю. А., С. м. р. о. м. я. т. и. к. в. В. Н., Фазовые переходы и симметрия кристаллов, М., 1984; Incommensurate phases in dielectrics, v. 1 — Fundamentals, v. 2 — Materials, Amst., 1986. А. Д. Левинзон.

**НЕСОХРАНЕНИЕ ЧЁТНОСТИ В ЯДРАХ** — отсутствие определённой чётности ядерных волновых функций по отношению к пространств. отражению (*P*-инверсии), т. е. по отношению к одновременно изменяющему направление всех координатных осей на противоположные (см. Чётность). Причиной Н. ч. в я. является слабое взаимодействие между составляющими ядро нуклонами (нейтронами и протонами). Ядерные силы с учётом слабого взаимодействия представляются в виде суммы доминирующего *P*-чётного вклада сильного взаимодействия и малой *P*-нечётной добавки слабого взаимодействия. Отсутств. величина (*F*) слабого межнуклонных сил в ядре определяется константой слабого взаимодействия  $G = 10^{-5} \text{ м}^2$  ( $m$  — масса нуклона) и безразмерной массой  $\mu/m$  в ядре, характеризующей межнуклонные расстояния  $1/\mu$  в ядре:

$$F = 10^{-5} (\mu/m)^2 \approx 2 \cdot 10^{-7}.$$

В результате модули волновой функции ядра до и после *P*-инверсии отличаются друг от друга, вообще говоря, на относит. величину  $\sim 10^{-7}$ . Малость эффекта затрудняет его эксперим. исследование.

Несохранение чётности на уровне порядка  $10^{-7}$  было зарегистрировано непосредственно в нуклон-нуклонном взаимодействии (1980) при рассеянии поляризов. протона на поляризов. протонной мишени [1]. Однако открытие Н. ч. в я. было сделано раньше (1964). Оно стало возможным благодаря тому, что в ряде случаев есть усиление эффектов Н. ч. в я., предсказанное теоретически [2,3]. Известны три источника такого усиления — динамич., кинематич. и структурное.

**Динамическое усиление.** Если пренебречь слабым взаимодействием, то ядерному состоянию  $\alpha$  с определённой чётностью отвечает волновая функция  $\psi_\alpha$ . При его учёте волновая функция имеет вид суперпозиции, содержащей помимо  $\psi_\alpha$  небольшую примесь состояний с чётностью, противоположной чётности  $\psi_\beta$ , причём наиб. вклад в примесь даёт волновая функция  $\psi_\beta$  ближайшего по энергии состояния  $\beta$  ядра:

$$\psi = \psi_\alpha + \alpha \psi_\beta. \quad (1)$$

Здесь  $\alpha = \langle \beta | H_W | \alpha \rangle / (\epsilon_\alpha - \epsilon_\beta)$ ,  $\langle \beta | H_K | \alpha \rangle$  — матричный элемент гамильтониана слабого взаимодействия между нуклонами,  $\epsilon_\alpha$ ,  $\epsilon_\beta$  — энергии состояний  $\alpha$  и  $\beta$ . При отсутствии усиления  $\alpha = F \sim 10^{-7}$ . Если энергии  $\epsilon_\alpha$  и  $\epsilon_\beta$  близки, то  $\epsilon_\alpha - \epsilon_\beta$  мало, что может усиливать примесь состояний с противоположной чётностью в  $10^2 - 10^3$  раз, т. е. до величин  $\sim 10^{-4}$ . Благоприятные условия для динамич. усиления возникают в тяжёлых ядрах, где плотность энергии, ур. энергии велика, а расстояния между уровнями малы.

**Кинематическое усиление.** Амплитуда *M* ядерной реакции (см. Амплитуда процесса) или  $\gamma$ -перехода между ядерными состояниями с образованием или распадом состояния с неопределённой чётностью может быть представлена в виде суммы:

$$M = M_a + \alpha M_b, \quad (2)$$

здесь  $M_a$  и  $M_b$  — амплитуды процесса (в пренебрежении слабым взаимодействием), соответствующие образованию или распаду состояний  $a$  и  $b$ , обладающих противоположными чётностями. Относит. величина не сохраняющего чётность вклада  $\alpha M_b$  усилена, если «основная» амплитуда  $M_a$  подавлена по к.-л. кинематич. причине. Пусть  $M_a$  и  $M_b$  — амплитуды поглощения ядром медленных продольно поляризованных нейтронов с орбитальными моментами  $L = 1$  или 0. При поглощении могут образовываться резонансные состояния ядра (*p*- и *r*-резонансы) с одним и тем же моментом, но с противоположными чётностями [чётность  $l = (-1)^L$ ]. Эти состояния смешиваются слабым взаимодействием, в результате амплитуда приобретает вид (2), т. е. возникает интерференция амплитуд противоположной чётности. Т. к. проекция спина нейтрона при *P*-инверсии не меняет знака, а импульс меняет, то проекция спина на импульс меняет знак при *P*-инверсии. Поэтому при сохранении чётности сечение поглощения не может зависеть от знака продольной поляризации нейтрона и должно оставаться неизменным при изменении поляризации на противоположную. Несохранение чётности проявляется в неодинаковости отвечающих амплитуде (2) сечений поглощения нейтронов, поляризованных по импульсу и против импульса. В *p*-резонансе отношение  $M_a/M_b$  пропорц.  $\sqrt{I_0/I_1} \sim kR$ , где  $I_0$  и  $I_1$  — пирины *p*- и *r*-резонансов,  $k$  — импульс нейтрона,  $R$  — радиус ядра. Для нейтронов с энергией порядка 1эВ фактор кинематич. усиления  $1/kR$  достигает  $10^2$ .

Если ядерные состояния не обладают определённой *P*-чётностью, то становится возможным испускание в одном и том же переходе магн. и электрич.  $\gamma$ -квантов одинаковой мультипольности, т. е. с одинаковыми полными моментами, но противоположными чётностями. При равной мультипольности магн. переходы происходят с меньшей вероятностью, чем электрические. Если «основной» переход (с сохранением *P*-чётности) — магнитный, то «примесный» электрич. переход будет происходить с большей вероятностью (см. Гамма-излучение). Пусть  $M_a$  и  $M_b$  — амплитуды испускания магн. и электрич. квантов, тогда  $M_a$  подавлена по сравнению с  $M_b$  в  $v/c$  раз ( $v$  — ср. скорость нуклона в ядре), а эффект усилен в  $c/v \approx 10^3$  раз.

**Структурное усиление** имеет место в случае, когда в ф-ле (2) «основная» амплитуда  $M_a$  подавлена по сравнению с  $M_b$  вследствие структурных особенностей состояний ядра, участвующих в переходе. Напр., «основной»  $M_1$  переход ( $1/2^+ \rightarrow 1/2^+$ ) с испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией 482 кэВ в ядре  $^{113}\text{Cd}$  подавлен, т. к. сопряжён с изменением орбитального момента нуклона на 2, а примесный  $E_1$  переход ( $1/2^+ \rightarrow 1/2^+$ ) не подавлен. Структурное усиление может достигать величин  $\sim 10^2 - 10^3$ .

Впервые Н. ч. в я. наблюдалось в угл. распределении  $\gamma$ -квантов, испускаемых при захвате поляризов. тепловых нейтронов ядром  $^{113}\text{Cd}$ :  $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$  [4]. При сохранении чётности угл. распределение  $\gamma$ -квантов  $W(\theta)$  ( $\theta$  — угол между импульсом  $\gamma$ -кванта и направлением поляризации нейтронов) не должно зависеть от знака проекции спина нейтрона на импульс  $\gamma$ -кванта и, следовательно, должно быть симметричным относительно направления поляризации нейтронов. На опыте была обнаружена асимметрия, описываемая ф-лой:

$$W(\theta) = 1 + \alpha \cos \theta,$$

причём  $\alpha = -(3.7 \pm 0.9) \cdot 10^{-4}$  (в отсутствие усиления можно было бы ожидать значение  $\alpha \sim 10^{-7}$ ). Впослед-



гравитационного слоя не остаются постоянными во времени. Эти изменения скорости и давления, наз. турбулентными пульсациями, являются наиб. характерным признаком турбулентности.

Турбулентные Н. д. изучаются гл. обр. эксперим. методами. Осн. предметом моделирования при эксперим. исследовании Н. д. является *Струйное число*  $Sh = v_0 L / \nu$ , где  $v_0$  — характерная скорость,  $L$  — характерный линейный размер рассматриваемого течения. Наиб. высокие уровни пульсаций давления наблюдаются в области *отрывных течений*. Так, в случае Н. д. образующегося на установившейся перед торцом цилиндра, обтекаемого в продольном направлении сверхзвуковым потоком, плге длиной 0,3–1 диаметра цилиндра при *Маха числах* потока  $M$  от 1,5 до 10 непроизвольно образуется и разрушается отрывная зона (среднеквадратичная величина пульсаций давления на торце  $\sigma_x = 0,8q_\infty$ , где  $q_\infty$  — скоростной напор набегающего потока). В выемках поверхностей, обтекаемых потоком, возникают резонансные колебания давления из-за срыва крупномасштабных вихрей с передней кромки выемки; и турбуле возникают пульсации давления па передней кромке ротора в результате периодич. пересечения турбулентного следа за статором лопатками колёс.

Н. д. часто встречается в технике. Важнейшими примерами являются автоколебания в воздухооборнках и компрессорах (помпах), колебания пещимаемой жидкости в трубопроводах и топливных магистралях, толкостенных элементов конструкции, явления, возникающие при вальте, посадке и изменении скорости полёта летат. аппаратов, флаттер, процессы в ударных трубах, переходные процессы при запуске и останове двигателей и др.

Лит.: Кочин Н. Е., Кибель Н. А., Розе Н. В., Теоретическая гидроаэродинамика, ч. 1, 6 изд., ч. 2, 4 изд., М., 1963; Дойд и динский Л. Г., Механика жидкости и газа, 6 изд., М., 1987; Зауэр Р., Нестационарные задачи газодинамики, пер. с нем., М., 1969; Шлихтер и Г. Г., Теория нестационарного течения, пер. с нем., М., 1969; Седов Л. И., Механика сплошной среды, 4 изд., т. 1–2, М., 1983–84; Овсянников В. П., Лекции по основам газовой динамики, М., 1981.

**НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ** жидкости и газа — течение, к-рое характеризуется переменностью во времени полей скорости и давления. Н. т. возникает при движении тела сквозь покоящуюся на бесконечности жидкость, при распространении волны (см. *Волны на поверхности жидкости*, *Ударная волна*), при ударе тела о поверхность жидкости, при движении поршня в трубе, заполненной газом. Подробнее см. *Неравновесное течение*.

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ** — нелинейные оптич. явления, наблюдаемые в импульсных и в модулированных во времени полях эл.-магн. волн. Большинство Н. п. о. я. обусловлено иперционностью среды, как иерционностью локального нелинейного отклика, так и иерционностью отклика среды в целом. Иерционность среды проявляется в том, что её линейная и (или) нелинейная поляризация в заданной точке в данный момент времени зависит от аначения исходных полей в более ранние моменты времени. Иперционность нелинейного отклика среды сказывается, если время отклика нелинейности больше длительности оптич. импульса или характерного времени модуляции волны. Иперционность линейного отклика проявляется как частотная (временная) дисперсия линейного показателя преломления среды. При нелинейном взаимодействии она чаще всего выступает в виде расстройки  $\nu_{nl} = \omega^{-1} - \omega^{-1}$  групповых скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$  взаимодействующих волн (см. *Групповое взаимодействие*).

Аналитически Н. п. о. я. описываются одним нелинейным ур-нием или системой связанных ур-ний в частных производных и соответствуют самовоздействию или взаимодействию световых волн (см. *Нелинейная оптика*). К Н. п. о. я. относятся самомодуляция импульса

(сжатие и расширение), самофокусировка, процессы преобразования оптич. частот при параметрич. взаимодействии и *вынужденном рассеянии света*. Напр., самомодуляция светового импульса описывается укороченным ур-нием вида

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \beta |A|^2 A = 0, \quad (1)$$

где  $A$  — комплексная амплитуда волны,  $\eta = t - z/u$ ,  $t$  — текущее время,  $u$  — групповая скорость, параметр  $g = -\partial^2 u / \partial \omega^2$  характеризует дисперсию групповой скорости. Величина  $\beta$  пропорциональна нелинейному *показателю преломления* среды  $n_2$ , причём ур-ние (1) соответствует безынерционному нелинейному отклику среды. С  $\beta \neq 0$  связано возникновение фазовой самомодуляции импульса, приводящей к уширению его спектра, ширина которого пропорциональна макс. интенсивности импульса, нелинейности показателя преломления  $n_2$  и пройденному расстоянию. Вследствие дисперсии среды разные спектральные компоненты импульса распространяются с разл. скоростью. В фокусирующей среде ( $\beta > 0$ ) эффект фазовой самомодуляции и аномальная дисперсия групповой скорости ( $g < 0$ ) приводит к сжатию импульса. Это происходит из-за того, что излпые частоты, возникающие на хвосте импульса, догонят высокие частоты, появившиеся на его фронте. В нелинейной среде с нормальной дисперсией групповой скорости ( $g > 0$ ) импульс, напротив, расширяется быстрее, чем в линейной среде. Эффекты сжатия и расширения импульса проявляются, напр., при распространении мощных пико- и фемтосекундных лазерных импульсов в оптич. волокнах. Особый практич. интерес представляет режим самосжатия, в к-ром форма импульса в среде остаётся неизменной — образуется т. н. *солитон* оптический.

Процессы самосжатия и саморасширения импульсов во многом аналогичны процессам самофокусировки и самодефокусировки световых пучков в стационарном случае. Последние наблюдаются, если время отклика нелинейности  $\tau_{nl}$  меньше длительности импульса. При нестационарном взаимодействии световых импульсов нелинейная добавка  $\delta n$  к показателю преломления (нелинейный отклик) среды определяется соотношением

$$\delta n(t, z) = (n_2/2\tau_{nl}) \int_{-\infty}^t |A(t', z)|^2 \exp[-(t-t')/\tau_{nl}] dt'. \quad (2)$$

В силу (2) нарастание  $\delta n(t, z)$  во времени происходит быстрее, нежели спад; это приводит к асимметричному уширению спектра: смещение частоты импульса происходит в основном в область НЧ (рис. 1).

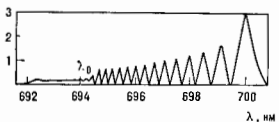


Рис. 1. Вид уширенного спектра гауссовского импульса длительностью 2,7 пс в среде с временем релаксации нелинейности 9 пс;  $\lambda_0$  — длина волны исходного импульса.

В случае нестационарной самофокусировки сверхкоротких световых импульсов (рис. 2, а) на переднем фронте импульса нелинейный отклик среды ещё не успевает установиться, поэтому эта часть импульса распространяется как в линейной среде, испытывая лишь дифракцию (лучи а и б рис. 2, б). При возникновении значит. добавки  $\delta n$  в центр. и задней частях импульса световой пучок самофокусируется (лучи в, г и д. рис. 2, б). В результате световой пучок сверхкороткой длительности принимает форму рупора, как показано на рис. 2 (б). Для нелинейности, возникающей под действием электр. поля, подобная картина самофокусировки наблюдается при длительности импульсов  $\sim 10^{-11}$ – $10^{-10}$  с.

При самовоздействии достаточно мощных световых импульсов искажение формы импульса возможно и в безы-

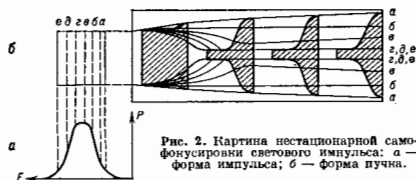


Рис. 2. Картина нестационарной самофокусировки светового импульса: а — форма импульса; б — форма пучка.

перционной среде. Важную роль при этом играет зависимость групповой скорости от интенсивности  $I$  распространяющегося импульса  $u \sim (n_0 + n_2 I)^{-1}$ . Середина гауссовского импульса (рис. 3), имеющая большую интенсивность, чем передний фронт, имеет меньшую групповую скорость и отстает (при  $n_2 > 0$ ), что приводит к укрупнению хвоста импульса. Накапливаясь вместе с расстоянием изменения формы импульса могут быть столь сильными, что возможно образование ударной волны обгоняющей (рис. 3). Это происходит на расстоянии  $L_{уд} = \tau c \text{ джм} / \partial n / \partial I_{\text{макс}}$ , где  $\partial n / \partial I_{\text{макс}}$  — макс. изменение показателя преломления.

Широкий класс Н. н. о. я. связан с преобразованием оптич. частот и процессами вынужденного рассеяния света. При взаимодействии световых волн нестационарность явлений связана гл. обр. с расстройкой групповых скоростей. Первоначально синхронизов. импульсы разных частот распространяются в среде с разными групповыми скоростями, что приводит к их разбеганию и прекращению взаимодействия. Этот эффект начинает скапливаться, когда время группового запаздывания им-

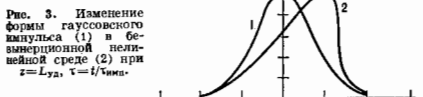


Рис. 3. Изменение формы гауссовского импульса (1) в бездисперсионной нелинейной среде (2) при  $z = L_{гр}$ ,  $\tau = t/v_{групп}$ .

пульсов  $\tau_{зап} = z/u_1 - z/u_2$  становится сравнимым с их длительностью ( $\tau_{зап} \lesssim \tau_{дл}$ ). При генерации оптич. гармоник групповая расстройка ограничивает спектральную ширину фазового синхронизма:

$$\Delta \lambda_1 = 4,39 \lambda_1^2 / n c l |u_2^{-2} - u_1^{-2}|, \quad (3)$$

где  $\lambda_1$  — длина волны осн. излучения,  $c$  — скорость света в вакууме,  $l$  — длина нелинейного взаимодействия,  $u_1$  и  $u_2$  — групповые скорости осн. волны и волны гармоники. Если ширина спектра осн. импульса превышает (3), то происходит удлинение импульса высшей гармоники и ограничение её макс. амплитуды. Иначе говоря, нестационарный процесс умножения оптич. частот оказывается менее эффективным, чем стационарный. В кристалле  $\text{LiNbO}_3$  длиной 1 см нестационарность нелинейного процесса сказывается при длительности осн. импульса  $\approx 6$  пс. Для импульсов субпикоундуной длительности наряду с расстройкой групповых скоростей определённую роль в нелинейном процессе может играть дисперсионное усиление взаимодействующих импульсов, связанное с дисперсией групповой скорости ( $g \neq 0$ ).

Нестационарные режимы вынужденного трёхчастотного и четырёхчастотного взаимодействия световых волн отличаются большим разнообразием. Общим, однако, является то, что смещение импульсов друг относительно друга из-за различия групповых скоростей приводит к снижению эффективности взаимодействия, к наличию предельного сужения усиливаемых или генерируемых импульсов. Особо стоит сказать о возмож-

ности модового режима параметрич. усиления в диспергирующей нелинейной среде, когда групповая скорость волны накачки является промежуточной по отношению к групповым скоростям сигнальной и холостой волн (см. *Параметрическое рассеяние*). При этом форма усиливаемого импульса сохраняется, а его амплитуда экспоненциально нарастает с расстоянием.

Среди нестационарных процессов вынужденного рассеяния света особое место занимает комбинац. рассеяние (КР), к-рое широко используется для измерения спектроскопич. параметров среды. При КР падающее излучение частоты  $\omega_0$  преобразуется в излучение стоксовой частоты  $\omega_s$  за счёт возбуждения колебаний среды на частоте  $\Omega$ : ( $\omega_s = \omega_0 + \Omega$ ). Нестационарное вынужденное КР может быть обусловлено как иррегулярностью, напр. молекулярных колебаний (конечными временами затухания колебат. энергии  $T_1$  и дефазировки  $T_2$ , см. *Двулучевная система*), так и расстройкой групповых скоростей волн накачки  $u_n$  и стоксовой волны  $u_s$ . Эффекты, связанные с  $T_2$  (в конденсир. средах  $T_2 \approx 10^{-11} - 10^{-12}$  с), могут наблюдаться «в чистом виде», когда изменением населённости уровней под действием процесса можно пренебречь. В существенно нестационарном режиме рассеяния (длительность импульса накачки  $\tau_n \ll T_2$ ) при  $v_{нс} = 0$  возбуждаемый стоксов импульс может быть значительно задержан, а его длительность гораздо меньше  $\tau_n$  (рис. 4). Картины вынужденного КР существенно изменяет и наличие групповой расстройки ( $v_{нс} \neq 0$ ). В случае попутного взаимодействия волн накачки и стоксовой наб. влияние на процесс

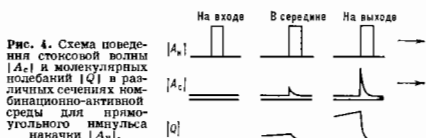


Рис. 4. Схема поведения стоксовой волны  $|A_s|$  и молекулярных колебаний  $|Q|$  в различных средах в комбинационно-активной среде для прямоугольного импульса накачки  $|A_n|$ .

оказывает фазовая модуляция накачки. На расстояниях, превышающих длину группового запаздывания  $L_{гр} = \pi / |v_{нс}| \Delta \omega_n$  ( $\Delta \omega_n$  — ширина спектра накачки), происходит рассогласование фаз накачки и стоксовой волны, к-рое приводит к уменьшению эфф. длины взаимодействия и в нек-рых случаях к полному подавлению вынужденного КР. Волновая нестационарность особенно ярко проявляется при встречном взаимодействии волн накачки и стоксовой, где  $v_{нс}^* = u_n^{-1} + u_s^{-1}$ . В этом режиме передний фронт стоксова импульса всё время взаимодействует с нестационарной накачкой, вследствие чего интенсивность стоксовой волны может значительно превышать интенсивность накачки. При одноврем. проявлении волновой и связанной с  $T_2$  локальной нестационарности возможно возникновение режима экспоненциального нарастания стоксовых импульсов в среде с нормальной дисперсией ( $u_c > u_n$ ) при  $z > \tau_n / |v_{нс}|$ .

Нестационарные эффекты, проявляющиеся при вынужденном КР, могут встречаться также и в процессе вынужденного рассеяния Мандельштама—Бриллюэна и др.

Определённый круг Н. н. о. я. связан с т. н. когерентным распространением световых импульсов в резонансных средах (см. *Самодиффузная прозрачность, Фотонное зр.*).

Докл. А х м а н о в С. А., С у х о р у к о в А. П., Х о х л о в Р. В., Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде, «УФН», 1967, т. 93, с. 19; А х м а н о в С. А., Ч и р к и н А. С., Статистические явления в нелинейной оптике, М., 1971; А х м а н о в С. А., К о р о т к о в Н. И., Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света, М., 1981;



Остон Д., Пинсоеукая нелинейная оптика, в кн.: Сверхкороткие световые импульсы, пер. с англ., М., 1981; А х и я н о в С. А., В ы с л о у х В. А., Ч и р к и н А. С., С а м о в о з д е й с т в и е в о л н о в ы х п а к е т о в в н е л и н е й н о й с р е д е и г е н е р а ц и я ф е м т о с е к у н д н ы х л а з е р н ы х и м п у л ь с о в, с у б ъ е к т, 1986, т. 149, с. 449; и х ж е, О п т и к а ф е м т о с е к у н д н ы х л а з е р н ы х и м п у л ь с о в, М., 1988. А. С. Чиркин.

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ** — понятие матем. пластичности теории. Н. с. характеризуется предельной нагрузкой, при к-рой начинается неограниченное возрастание пластич. деформации конструкции из идеальной-пластич. материала (см. *Идеально-пластическое тело*). Поскольку потеря Н. с. конструкции связана с неограниченным пластич. течением, величина уругих деформаций оказывается часто несущественной, поэтому во многих случаях имеет смысл рассматривать Н. с. ж е с т к о с т а с т и ч е с к и х т е л. Использование Н. с. для установления допустимых нагрузок приводит к уменьшению металлоёмкости конструкций.

Лит.: Е р х о в М. И., Теория идеально пластических тел и конструкций, М., 1978; Р а б о т н и к о в Ю. Н., Механика деформируемого твёрдого тела, М., 1979.

**НЕСУЩАЯ ЧАСТОТА** — частота гармоник. *несущего колебания*.

**НЕСУЩЕЕ КОЛЕБАНИЕ** — колебание, предназначенное для передачи модулирующего сигнала с заключённой в нём информацией. Само по себе Н. к. не содержит информации и, как правило, стационарно. Обычно Н. к. представляет собой гармонич. колебание (радиосвязь, локация и т. п.), частоту к-рого принято называть несущей частотой или периодич. последовательностью импульсов (многоканальная связь, информационно-измерит. системы). Информация вносится в Н. к. путём изменения (модуляции) к.-л. из его параметров, спектр модулирующего (информат.) сигнала перемещается при этом в более В-Ч-диапазон, пригодный для распространения на трассе приём-передача (см. также *Модулирование колебания*).

**НЕТЕР ТЕОРЕМА** — утверждает, что для всякой физ. системы, уравнения движения к-рой могут быть получены из вариан. принципа, каждому однопараметрич. непрерывному преобразованию, оставляющему вариан. функционал инвариантным, отвечает один дифференц. сохраненный закон, и, главное, позволяет явно выписать сохраняющуюся величину. Установлена в работах учёных геттингенской школы Д. Гильберта (D. Hilbert), Ф. Клейна (F. Klein) и Э. Нетер (E. Noether). Н. т. — самое универсальное средство, позволяющее находить законы сохранения в лагранжевой классич. механике, теории поля, квантовой теории и т. д.

В классич. механике для системы с *действием*

$$S = \int L(q_a(t), \dot{q}_a(t)) dt$$

(*L* — *Лагранжа функция*, зависящая от обобщённых координат  $q_a$  и скоростей  $\dot{q}_a$ ) инвариантность *S* относительно образующих группу преобразований с параметром  $\varepsilon$

$$t \rightarrow t' = t + \Lambda(q, t), \quad q_a(t) \rightarrow q'_a(t') = q_a(t) + \Lambda_a(q, t) \varepsilon \quad (1)$$

[где задающее преобразование ф-ции  $\Lambda(q, t)$ ,  $\Lambda_a(q, t)$  зависят от совокупности координат  $\{q_a\} \equiv q$  и времени] влечёт за собой, согласно Н. т., сохранение во времени величины

$$Q = \left[ L - \sum_a \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_a} \dot{q}_a \right] \Lambda + \sum_a \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_a} \Lambda_a.$$

В частности, из инвариантности *S* относительно (1) с  $\Lambda_a = 0$ ,  $\Lambda = 1$ , т. е. из однородности времени, следует закон сохранения энергии:

$$- \dot{S} = L - \sum_a \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_a} \dot{q}_a = \text{const.}$$

В этом случае *L* не зависит от времени явно. Подобным же образом из пвариантности *S* по отношению к прост-

ранства, сдвигам ( $\Lambda = 0$ ,  $\Lambda_a = 1$ ) следует закон сохранения импульса, а из изотропии пространства — закон сохранения трёхмерного момента.

В гамильтоновом описании, т. е. когда *Q* выражены через к а о н и ч е с к и е п е р е м е н н ы е — обобщённые координаты и импульсы (для простоты считаем, что явные зависимости от времени отсутствуют): 1) *Пуассона скобка Q с гамильтоном H* равна нулю, 2) изменение любой динамич. переменной *F* при преобразовании (1) определяется её скобкой Пуассона с *Q*. В этом контексте утверждение Н. т. становится как бы тривиальным, следующим из одной лишь антисимметричности скобок Пуассона:

$$0 = dH/d\varepsilon = (Q, H) \rightarrow 0 = (H, Q) = dQ/dt.$$

Если преобразования симметрии образуют не однопараметрич. группу, то между *Q*<sub>A</sub> должны выполняться соотношения в скобках Пуассона, воспроизводящие *Ли алгебру* генераторов соответствующей группы. Так, напр., три компонента момента должны удовлетворять соотношению в скобках Пуассона

$$(M_i M_k) = -\varepsilon_{ikl} M_l, \quad i, k, l = 1, 2, 3$$

(где  $\varepsilon_{ikl} = \text{Левы-Числны символ}$ ), воспроизводящему алгебру Ли группы трёхмерных вращений *O*(3).

Особо важное значение Н. т. приобретает в *квантовой теории поля* (КТП), где вытекающие из наличия группы симметрии законы сохранения часто оказываются единств. источником информации о свойствах системы. Для формального вывода Н. т. в (классич. или квантовой) теории поля рассматривают интеграл действия:

$$S = \int_{\mathcal{M}} [ \Phi^a(x), \Phi^b_{,\nu}(x); x^\mu ] d^4x; \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3, \quad (2)$$

где  $L[\Phi^a(x), \Phi^b_{,\nu}(x); x^\mu]$  — *лагранжиан*, зависящий от ф-ций поля  $\Phi^a(x)$ , их первых производных по всем четырём координатам  $\Phi^a_{,\nu} \equiv \partial \Phi^a / \partial x^\nu$  и, возможно, от координат  $x^\mu$  ( $x = (x^\mu)$  — точка пространства-времени; индекс *a* нумерует компоненты поля; принята система отсчёта, в к-рой  $\hbar = c = 1$ ). Тогда Н. т. утверждает, что из инвариантности действия (2) относительно преобразований с параметрами  $\varepsilon^A$

$$x^\mu \rightarrow x'^\mu = x^\mu + \Lambda^{\mu A}(x) \varepsilon^A,$$

$$\Phi^a(x) \rightarrow \Phi'^a(x') = \Phi^a(x) + \mathcal{S}^{\mu A}(x) \Phi_b(x) \varepsilon^A$$

для произвольной области интегрирования *R* вытекает дифференц. закон сохранения:

$$dJ^{\mu A} / dx^\mu = 0, \quad (3)$$

где т. н. нетеров ток  $J^{\mu A}$  вычисляется из лагранжиана по правилу:

$$J^{\mu A} = T^{\mu \nu} \Lambda^{\nu A} + \frac{\partial L(x) \Phi_b}{\partial \Phi_{,\mu}^a} \mathcal{S}^{ab} \varepsilon^A, \quad (4)$$

где

$$T^{\mu \nu} = \delta^{\mu \nu} L(x) - \frac{\partial L}{\partial \Phi_{,\mu}^a} \Phi_{,\nu}^a \quad (5)$$

( $\delta^{\mu \nu}$  — символ Кронекера; по повторяющемуся индексу предполагается суммирование). Интегрируя (3) по произвольному 4-объёму и используя *Гаусса теорему*, получаем, что полный 4-поток вектора  $J^{\mu A}$  через ограничивающую этот объём гиперповерхность равен нулю. Выбирая гиперповерхность в виде цилиндра с пространственноподобными основаниями, такого, что потоком через боковые стенки можно пренебречь, приходим к утверждению, что направленные в будущее потоки век-

тора  $J_A^\mu$  через нижнее и верхнее основания равны. Отсюда следует, что вётеровы заряды

$$Q_A(t) = \int_{x^0=t} J_A^0(x) d^3x, \quad (6)$$

во-первых, сохраняются во времени (и интегральная форма Н. т.), во-вторых, преобразуются при Лоренца преобразованиях ковариантно соответствующим параметрам  $\epsilon^A$ .

Из физ. представлений об однородности и изотропии пространства-времени следует, что для любой замкнутой системы действие должно быть инвариантно относительно преобразований Пуанкаре группы, в силу Н. т. приводит к существованию 10 фундаментальных  $x$  сохраняющихся величин: энергии, трёх компонент импульса и 6 компонент 4-момента. Сохранение энергии и импульса следует из инвариантности относительно трансляций  $\delta x^\mu = a^\mu$ . При этом  $A = \mu$ ,  $\epsilon^{\alpha\beta} = 0$ , вётеровы токи исчерпываются выражением (5) и образуют тензор энергии и импульса. Сохраняющиеся «заряды» суть компоненты 4-импульса:

$$P_\mu = \int_{x^0=t} T^0_{\mu\nu} d^3x.$$

Из инвариантности относительно трёх пространств. поворотов и трёх преобразований Лоренца

$$A = (\mu, \nu); \epsilon^A = \omega^\mu = -\omega^\mu; \Lambda^0_\alpha = \delta^0_{\alpha\nu} x^\nu$$

(где  $g_{\mu\nu}$  — метрический тензор) вытекает дифференц. закон сохранения для тензора плотности момента

$$M^{\alpha\beta}_\nu = -\frac{1}{2} T^{\alpha\mu}_\nu x_\mu + \frac{1}{2} T^{\beta\mu}_\nu x_\mu + \frac{\partial L(x)}{\partial \varphi^{\alpha\beta}} \epsilon^{\alpha\beta} \varphi^\nu;$$

$\epsilon^{\alpha\beta}$  определяется спином полей. Соответствующий вётеров заряд есть 4-момент.

В гамилтоновом описании 10 фундам. величин являются генераторами соответствующих преобразований группы Пуанкаре и образуют относительно скобок Пуассона замкнутую алгебру Ли

$$(P_\mu, P_\nu) = 0;$$

$$(M_{\alpha\beta}, P_\nu) = -(\delta_{\alpha\nu} \beta_\sigma - \delta_{\beta\nu} \alpha_\sigma) P^\sigma; \quad (7)$$

$$(M_{\alpha\beta}, M_{\gamma\delta}) = -g_{\mu\nu} M_{\alpha\gamma} + g_{\nu\mu} M_{\alpha\delta} + g_{\mu\alpha} M_{\beta\gamma} - g_{\mu\beta} M_{\alpha\delta}.$$

изоморфную алгебре Ли группы Пуанкаре. Требование выполнения соотношений (7) в гамилтоновом формализме эквивалентно требованию инвариантности лагранжиана относительно группы Пуанкаре в лагранжевом формализме.

При наличии в системе симметрич. не связанных с пространством-временем (внутренних симметрий), Н. т. позволяет построить и другие сохраняющиеся величины. При этом в выражении (4) для вётерова тока остаётся только второй член. Напр., если в системе с комплексным полем  $\varphi^a$  действие инвариантно относительно глобального (с фазой  $\alpha$ , не зависящей от  $x$ ) калибровочного преобразования 1-го рода

$$\varphi^a \rightarrow \varphi^a \exp(i\alpha); \varphi^{*a} \rightarrow \varphi^{*a} \exp(-i\alpha),$$

то будут сохраняться ток

$$j^\mu(x) = i \left( \frac{\partial L(x)}{\partial \varphi^{*a}} \varphi^a - \varphi^{*a} \frac{\partial L(x)}{\partial \varphi^a} \right)$$

и соответствующий заряд. В построении совр. реалистич. квантовополевых моделей токи и заряды, сохраняющиеся в силу инвариантности относительно достаточно сложных калибровочных групп, играют ведущую роль.

Выражение (4) для пространственно-временной локализации вётерова тока (это выражение наз. к а н о н и е с к и м) не однозначно, если исходить только из требования выполнения дифференц. закона сохранения(3)

и получения правильной интегральной величины (6). Выполнение этих требований не нарушается при замене

$$J_A^\mu \rightarrow J_A^\mu + \frac{\partial f_A^{\mu\nu}(\varphi^a; \varphi^{*a})}{\partial x^\nu}; f_A^{\mu\nu} + f_A^{\nu\mu} = 0$$

с произвольной ф-цией  $f$ . Этим произвольно пользуются, чтобы заменить канонич. тензор  $T^{\mu\nu}$  (5) (не симметричный для отличного от нуля спина) на симметричный (тензор Беллифанта), выбирая

$$f^{\mu\nu} = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{\partial L}{\partial \varphi^{*a}} \epsilon^{\alpha\beta} \varphi^a \varphi^\beta + \frac{\partial L}{\partial \varphi^a} \epsilon^{\alpha\beta} \varphi^{*a} \varphi^\beta + \frac{\partial L}{\partial \varphi^{*a}} \epsilon^{\alpha\beta} \varphi^a \varphi^\beta \right\}.$$

Для нулевого спина то же преобразование позволяет получить для безмассового поля  $T^{\mu\nu}$  с нулевым следом.

Однозначные выражения для вётеровых токов получаются варьированием по полям, для к-рых эти токи служат источниками.

Для теорий, обладающих суперсимметрией, независимыми переменными при выводе Н. т. будут наряду с  $x$  и антикоммутирующие координаты  $\theta_\alpha$  ( $\alpha$  — спинорный индекс). Это приводит к обобщению фундам. сохраняющихся величин, а также к появлению новых сохраняющихся величин: спин-векторных токов и соответствующих им суперзарядов, образующих представление супералгебры Пуанкаре.

Для классич. теорий поля выписанных формальных выражений вполне достаточно. В квантовой теории поля выражения (4), (6), как правило, нуждаются в регуляризации (см. Регуляризация расходимостей) и перенормировке. При этом может оказаться, что формально имеющаяся симметрия не может быть сохранена для регуляризов. выражений, и соответствующий закон сохранения перестаёт выполняться — говорит, что присутствует аномалия. Так, при рассмотрении взаимодействия безмассовых фермионов с эл.-магн. полем в классич. теории наряду с векторным сохраняется также и аксиальный ток  $j^{\mu 5} = \Psi \gamma^\mu \gamma^5 \Phi$  ( $\gamma^5$  — Дирака матрица). В квантовой теории во втором порядке по заряду  $e$  возникает аномалия, и вместо сохранения тока получаем

$$\frac{d j^{\mu 5}}{d x} \sim e^2 g^{5\nu\rho\sigma} F_{\nu\mu} F_{\rho\sigma}.$$

Вторая теория Нейтер. Помимо обсуждавшейся выше Н. т., к-рую принято называть первой Н. т., существует вторая Н. т., к-рая касается тождеств, вытекающих из инвариантности действия относительно преобразований, зависящих от непрерывного параметра, т. е. от произвольной ф-ции. Наиб. значение она получает в применении к случаю «полей материи», взаимодействующих с калибровочным полем  $A(x)$  — полем, физ. содержание к-рого не меняется при определенных, зависящих от произвольной ф-ции  $\lambda(x)$  преобразованиях, называемых преобразованиями калибровки. Вычисляя вариацию действия для поля материи во внеш. калибровочном поле, вызванную бесконечно малым калибровочным преобразованием  $\delta \lambda(x)$ ,  $\delta \lambda(x) = 0$  на границах области интегрирования, следует учитывать только вызываемые изменением калибровки вариации калибровочного поля  $\delta A = \sqrt{\delta \lambda}$  (здесь  $\sqrt{\delta \lambda}$  — ковариантная производная), поскольку при вариациях полей материи коэффициентами будут левые части ур-ний движения. Поэтому

$$\delta S_\lambda = \int d^4x \frac{\delta L}{\delta A} \delta A = - \int d^4x \nabla \left( \frac{\delta L}{\delta A} \right) \delta \lambda,$$

откуда в силу произвольности  $\delta \lambda(x)$  вытекает ковариантный закон сохранения

$$\nabla j = 0; j = \frac{\delta L}{\delta A}. \quad (8)$$

При обращении в ф-ле (8) внеш. калибровочного поля в нуль ковариантный закон сохранения превращается в обычный, получаемый по первой Н. т. Подчеркнём, что

вторая Н. т. приводит к ограничениям на поля материи, исходя из особенностей калибровочного поля. Т. о., она устанавливает соответствие между свойствами материальных систем и полей, в к-рых они могут взаимодействовать. Поскольку в правых частях ур-ний движения самих калибровочных полей стоят как раз токи (8), то вторая Н. т. налагает тождеств. соотношения на левые части этих ур-ний. В совр. квантовой теории поля вторая Н. т. используется в электродинамике, теории Янга — Миллса полей, гравитации, супергравитации и т. д.

Неупорядоченные системы — вещества в конденсир. состоянии, в к-рых отсутствует строгая упорядоченность расположения атомов, т. е. отсутствует дальний порядок (см. *Дальний и ближний порядок*). Н. с. являются жидкие и аморфные вещества, а также *твердые растворы*, поскольку атомы замещения располагаются в них неупорядочно. Особый класс Н. с. составляют высокотемпературные фазы некр-рых соединений (напр., AgI), в к-рых анионы располагаются упорядочно, а катионная подрешетка «расплавлена», благодаря чему эти фазы обладают аномально высокой ионной электропроводностью (см. *Ионные суперпроводники*). Легированные кристаллич. полупроводники с точки зрения их электронных свойств также представляют собой при низких темп-рах Н. с., поскольку хаотически расположенные заряд. примеси создают случайный потенциал, к-рый может сильно влиять на движение электронов и препятствовать переносу заряда.

Расположение атомов в жидкостях и аморфных веществах нельзя считать некоррелированным. Радиальная ф-ция распределения, описывающая ср. число соседей на заданном расстоянии от случайно выбранного атома, имеет в этих веществах неск. четко выраженных максимумов, отражающих корреляцию в расположении соседей в пределах неск. координац. сфер. На больших расстояниях максимумы исчезают. Ближний порядок определяется взаимодействием соседних атомов и зависит от характера связи между ними. Напр., в ряде *аморфных металлов* ближний порядок хорошо описывается в рамках модели твердых шаров со случайной плотной упаковки. Простейшую реализацию этой модели можно получить, если положить в банку большое кол-во одинаковых твердых шаров, потрясти их, а затем сдавить. Ср. число ближайших соседей в такой модели близко к 12. Для атомов с ковалентным типом связи (типичные полупроводники) характерна фиксация углов между связями. Так, в аморфных Ge и Si (см. *Аморфные и стеклованные полупроводники*) четыре ближайших соседа расположены в вершинах тетраэдра, и центре к-рого находится исходный атом, т. е. точно так же, как в соответствующих кристаллах. Однако, в отличие от ковалентных кристаллов, соседние тетраэдры повернуты друг относительно друга на случайные углы, так что дальний порядок отсутствует.

Аморфное состояние вещества не является термодинамически равновесным. Оно метастабильно, и время его жизни может быть очень большим. Вещества в аморфном состоянии получают из жидкой фазы путем быстрого охлаждения или из газообразной фазы нанолением на холодную подложку. При этом ближний порядок выражен тем меньше, чем больше скорость охлаждения или ниже темп-ра  $T$  подложки.

Термодинамич. свойства многих аморфных диэлектриков при низких темп-рах определяются специфич. элементарными возбуждениями, свойственными атому

или группе атомов, к-рые могут занимать две близкие по энергии, но разнесенные в пространстве позиции. Переход из одной позиции в другую происходит за счет туннелирования. Эти образования наз. д. в. у. р. и имеют вид систем м. п. Энергия возбуждений может меняться в широких пределах, причём при малых энергиях соответствующая ф-ция распределения слабо зависит от энергии. Это объясняет почти линейную температурную зависимость электронной *теплоёмкости* при низких  $T$  в противоположность рёшточной (фононной) теплоёмкости (свойственной кристаллич. диэлектрикам), к-рая пропорциональна  $T^3$  (см. *Дебая закон теплоёмкости*). Двухуровневые системы проявляют также в низкотемпературном аномалиям *теплопроводности*, т. к. вызывают резонансное рассеяние ДВ-фононов, осуществляющих перенос тепла.

Анализ электронных свойств Н. с. показывает, что благодаря существованию ближнего порядка возможно приближённое описание Н. с. в терминах разрешённых и запрещённых энергетич. зон (см. *Зонная теория*). Н. с. могут быть диэлектриками, полупроводниками и металлами. Свойственные Н. с. многочисленные нарушения кристаллич. решётки приводит в аморфных металлах к дополнит. механизму рассеяния электронов. В аморфных полупроводниках возникают электронные состояния в запрещённой зоне, так что плотность состояний не обращается в 0 на границе разрешённых зон, а монотонно убывает в глубь запрещённой зоны, как правило экспоненциально:  $\exp[-(\epsilon_c - \epsilon) / \epsilon_0]$ , где  $\epsilon_c$  — энергия,  $\epsilon_0$  — условная энергия границы разрешённой зоны, а  $\epsilon_0$  — характерная энергия, к-рая значительно меньше ширины запрещённой зоны  $\epsilon_g$ . «Хвост» плотности состояний в запрещённой зоне проявляется в межзонном оптич. поглощении, к-рое не обращается сразу после того, как энергия фотона  $h\nu$  становится  $< \epsilon_g$ , а плавно спадает с уменьшением энергии, так что «оптич.» границы зон оказываются слегка размытыми. Однако в целом электронные зоны в аморфных и кристаллич. полупроводниках одного хим. состава различаются не очень сильно.

Нарушения кристаллич. структуры приводят в определённой части энергетич. спектра к локализации электронных и фононных состояний. В аморфных полупроводниках локализованными оказываются электронные состояния, лежащие в запрещённой зоне там, где плотность состояний относительно мала. Электроны, находящиеся в локализов. состояниях, могут переносить ток лишь путём «прыжков» из одного состояния в другое (см. *Прыжковая проводимость*). Т. к. состояния имеют разную энергию, прыжки осуществляются лишь с поглощением или испусканием фононов. При  $T = 0$  К этот механизм не работает и локализов. состояния вообще не могут переносить электрич. ток. Энергетич. граница между локализов. и делокализов. состояниями наз. порогом подвижности. Хим. потенциал (уровень Ферми  $\epsilon_F$ ) в аморфных полупроводниках находится глубоко в запрещённой зоне, и при не очень низкой  $T$  электропроводность осуществляется с помощью теплового затора электронов в состоянии, лежащие выше порога подвижности. Т. о., порог подвижности играет роль «электрич.» границы разрешённой зоны. При самых низких темп-рах электропроводность становится прыжковой.

Концепция порога подвижности применима и к легированным кристаллич. полупроводникам. В этом случае положение уровня  $\epsilon_F$  может изменяться вследствие изменения концентрации электронов или примесей. Если уровень  $\epsilon_F$  проходит на энергетич. шкале через порог подвижности, происходит переход от активной электропроводности к металл. Экстраполированная к  $T = 0$  К электропроводность  $\sigma$  на металл. стороне обращается в 0 в точке перехода. По существующим теоретич. представлениям, обращение  $\sigma$  в 0 происходит не скачкообразно, а плавно, однако это вывод нельзя считать окончательным, т. к. теория не учитывает флу-

туаций электропроводности вблизи точки перехода, а также электрон-электронное взаимодействие.

В твёрдых растворах неупорядоченность играет относительно малую роль, т. к. обычно потенциалы замещающих атомов не сильно отличаются от потенциалов замещаемых атомов. Поэтому в первом приближении можно считать твёрдый раствор идеальным кристаллом, параметры  $m$ -рого являются промежуточными между параметрами смешиваемых компонентов (приближение виртуального кристалла). Однако в ряде свойств проявляются пространств. флуктуации состава раствора. Они вызывают, напр., рассеяние носителей заряда, уширение экситонных линий. Наблюдается также названная флуктуациями состава локализация экситонов в твёрдых растворах.

В твёрдых растворах и сплавах, содержащих магн. атомы, возникает неупорядоченность в расположении их спинов. Энергия спин-спиновой взаимодействия сильно зависит от расстояния и может менять знак при небольших вариациях межатомного расстояния. Системы, обладающие таким свойством, наз. *спиновыми стеклами*. Расположение спинов в осн. состоянии спиновых стёкол является неупорядоченным, но вполне определённым для заданного расположения атомов. Наб. важное экспериментально наблюдаемое проявление спиновой неупорядоченности такого типа — догворем. магн. релаксация, состоящая в том, что при низких темп-рах  $T$  намагниченность системы определяется не только внеш. магн. полем и  $T$ , но и предострой образца.

Лит.: Шкловский Б. И., Эфрос А. Л., Электронные свойства легированных полупроводников, М., 1978; Ли Ян-ли и М. Грэдескул С. А., Пастур Л. А., Введение в теорию неупорядоченных систем, М., 1982; Мотт Н., Дэвис Э., Электронные процессы в некристаллических веществах, пер. с англ., 2 изд., т. 1—2, М., 1982; Замятн Д. И., Молдавская пер. с англ., М., 1982. А. П. Зворыкин.

**НЕУПРУГОЕ ПРОЦЕССЫ** (неупругое рассеяние) — столкновение частиц, сопровождающееся изменением их внутр. состояния, превращением в др. частицы или дополнит. рождением новых частиц. Н. п. являются, напр., возбуждение или ионизация атомов при их столкновении, ядерные реакции, превращения элементарных частиц при соударении или множеств. рождение частиц. Для каждого типа (канала) Н. п. существует своя наименьшая (пороговая) энергия столкновения, начиная с к-рой возможно протекание данного процесса. Полная вероятность рассеяния при столкновении частиц (характеризуемая полным эфф. сечением рассеяния) складывается из вероятностей упругого рассеяния и Н. п.; при этом между упругими и неупругими процессами существует связь, определяемая *оптической теоремой*.

С. С. Герштейн.

**НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ** — метод исследования атомной динамики вещества (преим. в твёрдых телах и жидкостях). Изменение энергии нейтрона  $\Delta\epsilon$  при неупругом рассеянии и зависимость  $\Delta\epsilon$  от переданного импульса несёт информацию о спектре возбуждений вещества. Н. р. н. на ядрах (см. *Нейтронорафия*) применяется для изучения элементарных возбуждений (*квазичастиц*), связанных с трансляц., колебл. и вращат. степенями свободы атомов и молекул. Магн. Н. р. н. позволяет исследовать возбуждения, возникающие при изменении спиновых и (или) орбитальных состояний электронов. Когерентная составляющая Н. р. н. даёт информацию о коллективных возбуждениях частиц (фононах, магнонах и т. д.), а некогерентная — о возбуждениях индивидуальных частиц (спонтанной моды или вихрей, диффузии и т. д.).

Теоретическое описание. Рассеяние нейтронов веществе принято описывать сечением рассеяния  $\sigma$ , отнесённым к элементу телесного угла  $d\Omega$  и интервалу рассеянных энергий нейтронов  $d\epsilon$ . Рассеяние нейтронов представляется в виде суммы когерентной и некогерентной составляющих, первая из к-рых имеет интерферент. природу, а вторая определяется суммой сечений рассеяний от отд. частиц.

Дифференц. сечение когерентного рассеяния на одну частицу для системы из частиц одного сорта может быть представлено в виде

$$\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\epsilon}\right)_K = \frac{p_0}{p_0} b_K S(\mathbf{Q}, \varphi), \quad (1)$$

где  $p_0$  и  $p$  — импульсы падающего и рассеянного нейтронов с энергиями  $\epsilon_0 = p_0^2/2m$  и  $\epsilon = p^2/2m$  ( $m$  — масса нейтрона);  $\hbar\omega = \epsilon_0 - \epsilon$  и  $\hbar Q = p_0 - p$  — изменение энергии и импульса нейтрона при рассеянии;  $b_K$  — когерентная амплитуда рассеяния (значения  $b_K$  табулированы). Когерентная ф-ция рассеяния  $S(\mathbf{Q}, \omega)$  определяется только свойствами системы:

$$S(\mathbf{Q}, \omega) = \frac{1}{2\pi\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{-i\omega t} \int d^3r e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r}} G(\mathbf{r}, t). \quad (2)$$

Здесь  $G(\mathbf{r}, t)$  — парная *корреляционная функция*, описывающая пространственно-временную корреляцию в расположении частиц системы:

$$G(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{N} \int d^3r' \langle \rho(\mathbf{r}' - \mathbf{r}, t = 0) \rho(\mathbf{r}', t) \rangle, \quad (3)$$

где  $\rho(\mathbf{r}, t)$  — плотность частиц в точке  $\mathbf{r}$  пространства в момент времени  $t$ , а среднее (...) вычисляется по равновесному состоянию системы частиц. Усреднённое по времени значение парной корреляц. ф-ции

$$G_{\infty}(\mathbf{r}) = G(\mathbf{r}, t \rightarrow \infty) = \frac{1}{N} \int d^3r' \langle \rho(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) \rho(\mathbf{r}') \rangle$$

определяет в (2) упругое рассеяние, происходящее без изменения энергии нейтронов,  $S_{\text{уп}}(\mathbf{Q}, \omega) \sim \delta(\hbar\omega)$ . Неупругое рассеяние в (2) определяется разностью  $G'(\mathbf{r}, t) = G(\mathbf{r}, t) - G_{\infty}(\mathbf{r})$ , зависящей лишь от флуктуаций плотности частиц,  $\delta\rho(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}, t) - \langle \rho(\mathbf{r}) \rangle$ . Т. о., когерентное Н. р. н. определяется динамикой флуктуаций плотности частиц вещества и поэтому связано с коллективными возбуждениями системы.

Дифференц. сечение некогерентного рассеяния описывается ф-лой

$$\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\epsilon}\right)_{\text{НК}} = \frac{p}{p_0} \frac{\sigma_{\text{НК}}}{4\pi} \frac{1}{2\pi\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{-i\omega t} \int d^3r e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r}} G_s(\mathbf{r}, t), \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{НК}}$  — сечение некогерентного рассеяния для частиц данного сорта ( $\sigma_{\text{НК}}$  табулированы). Автокорреляц. ф-ция

$$G_s(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{N} \sum_i \langle \delta\mathbf{R}_i(t) - \mathbf{R}_i(0) - t \mathbf{v}_i \rangle, \quad (5)$$

где  $\mathbf{R}_i(t)$  — координата  $i$ -й частицы в момент времени  $t$ . Ф-ция  $G_s(\mathbf{r}, t)$  описывает временную корреляцию в положении одной и той же частицы и поэтому несёт информацию о динамике (колебаниях, диффузии и т. д.) отд. частиц.

Н. р. н. в кристаллах. Наб. успешно метод Н. р. н. используется при исследовании *колебаний кристаллической решётки*. Он позволяет определить фоновые дисперсионные кривые и плотность фононных состояний. Кристаллы обладают трансляц. симметрией, и поэтому малые колебания атомов в них характеризуются определёнными значениями волнового вектора  $\mathbf{q}$ , характеризующего пространство, когерентность смещений атомов решётки. В результате этого зависимость сечения когерентного (однофонового) рассеяния нейтронов от их энергии содержит резко выраженные пики, положение к-рых определяется законами сохранения энергии  $\hbar\omega = \hbar\omega_{\mathbf{q}}(\mathbf{q})$  и импульса  $\hbar\mathbf{Q} = \hbar(\mathbf{q} + \mathbf{H})$ , где  $\omega_{\mathbf{q}}(\mathbf{q})$  — частота колебаний ветви  $\lambda$  с волновым вектором  $\mathbf{q}$ , введённым к первой зоне Бриллюэна с помощью выбора вектора *обратной решётки*  $\mathbf{H}$ .

Для моноатомной решётки ф-ция однофонового когерентного рассеяния

$$S(\mathbf{Q}, \omega) = [1 + n(\omega)] \sum_{\mathbf{q}} |G_{\mathbf{q}}|^2 \frac{2\omega\Gamma_{\mathbf{q}}(\mathbf{q})}{(\omega^2 - \omega_{\mathbf{q}}^2)^2 + [2\omega\Gamma_{\mathbf{q}}(\mathbf{q})]^2}. \quad (6)$$

Здесь  $n(\omega) = [\exp(\hbar\omega/kT) - 1]^{-1}$ ; т. п. структурная амплитуда  $G_\lambda(q, Q) = |Qe_\lambda(q)/\sqrt{M}|\exp(-W)$  определяет зависимость интенсивности рассеяния от величины передаваемого импульса  $Q$  и его ориентации относительно вектора поляризации  $e_\lambda(q)$  исследуемого фона ( $M$  — массы атомов,  $W(Q)$  — тепловой Дебая — Уоллера фактор). Спектральная интенсивность когерентного Н. р. и. определяется вторым сомножителем в (6), где  $\Gamma_\lambda(q)$  — затухание (величина, обратная времени жизни) фона. Для слабозатухающих фононов  $[\Gamma_\lambda(q) \ll \omega_\lambda(q)]$  интенсивность рассеяния имеет два острых максимума при  $\omega = \pm \omega_\lambda(q)$  с полушириной пиков  $2\Gamma_\lambda(q)$ . Температурная зависимость Н. р. и. с возбуждением фона в кристалле ( $\omega = \omega_\lambda(q) > 0$ ) или поглощением его ( $\omega = -\omega_\lambda(q) < 0$ ) определяется множителями  $1 + n(\omega_\lambda(q))$  или  $n(\omega_\lambda(q))$ .

В экспериментах обычно измеряется зависимость сечения рассеяния от  $q$  при разл. значениях вектора  $Q$ . По положению её максимумов и но их ширине с помощью обратного преобразования Фурье находится зависимость частоты фононов  $\omega_\lambda$  и их затухания  $\Gamma_\lambda$  от волнового вектора  $q$  для каждой ветви  $\lambda$  колебаний (рис. 1).

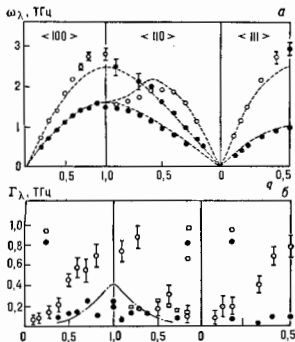


Рис. 1. а — фононные дисперсионные кривые  $\omega_\lambda(q)$ ; б — затухание  $\Gamma_\lambda(q)$  для продольных (○) и поперечных (●) акустических фононов в гранатированной кубической решётке \*Не при  $T = 16$  К (молярный объём 11,72 см<sup>3</sup>); пунктир — теоретические кривые.

Н. р. и. даёт информацию о структурных фазовых переходах 2-го рода в кристаллах, и т. ч. сегнетоэлектрических. В частности, удаётся исследовать поведение т. п. критической «мягкой» моды колебаний, частота к-рой  $\omega_c \rightarrow 0$  при  $T \rightarrow T_c$  ( $T_c$  — темп-ра фазового перехода), а вектор поляризации описывается статистик. волну смещений атомов с волновым вектором  $q_c$  «замораживающую» при  $T < T_c$ . Сечение рассеяния в этом случае обычно имеет один квазиузкий пик при  $\omega \approx 0$  и  $q = q_c$ , полная интенсивность к-рой растёт как  $1/\omega_c^2 \sim (T - T_c)^{-1}$ , а ширина  $\Gamma_c \sim \omega_c^2$  уменьшается как  $(T - T_c)^2$ , где  $\gamma \geq 1$  наз. критич. индексом (см. *Критические явления*). Н. р. и. при  $T \rightarrow T_c$  отражает появление в кристалле упорядоченных областей новой фазы, время жизни к-рых  $\tau_c = 1/\Gamma_c$ , и размеры неограниченно возрастают при  $T \rightarrow T_c$ .

Некогерентное Н. р. и. происходит на отд. атомах независимо и поэтому волновой вектор  $Q$  не фиксируется. В результате этого сечение некогерентного рассеяния определяется лишь знаком сохранения энергии  $\omega = \pm \omega_\lambda$ . Поэтому оно имеет вид плавной ф-ции частоты  $\omega$ , характеризующей плотность фононных состояний  $g(\omega)$ . Для моноатомной решётки сечение некогерентного Н. р. и. может быть представлено в виде:

$$\frac{1}{N} \frac{d^2\sigma}{d\Omega d\mathcal{E}} = \frac{p}{2v} \frac{\sigma_{\text{эл}}}{4\pi} [1 + n(\omega)] e^{-2W(Q)} \frac{\hbar Q^2}{2M\omega} \varphi(\mathbf{x}, |\omega|), \quad (7)$$

$$\varphi(\mathbf{x}, \omega) = (1/N) \sum_{q,\lambda} |x e_\lambda(q)|^2 \delta(\omega - \omega_\lambda(q)).$$

Для кубич. решётки  $|x e_\lambda(q)|^2 = 1/3$  и ф-ция  $\varphi(\mathbf{x}, \omega) = (1/3N) \sum_{q,\lambda} \delta(\omega - \omega_\lambda)$  определяет плотность фононных состояний.

Некогерентное Н. р. и. часто используется для исследования динамики решётки водородсодержащих кристаллов, т. к. в этом случае осн. вклад в сечение рассеяния дают фононы ( $\sigma_{\text{эл}}$  велико,  $M$  протона мала). Напр., в зависимости плотности фононных состояний  $\varphi$  от энергии фононов  $\hbar\omega$  для поликристаллич.  $\text{C}_6\text{H}_5\text{SO}_4$  пикн а, б, в обусловлены рассеянием на протонах (рис. 2). При  $T = 414$  К этот кристалл испытывает структурный фазовый переход в состояние с высокой ионной проводимостью (см. *Ионные сверхпроводники*), к-рый сопровождается разупорядочением протонов в решётке. Рис. 2 показывает, что это приводит к изменению спектра фононных частот.

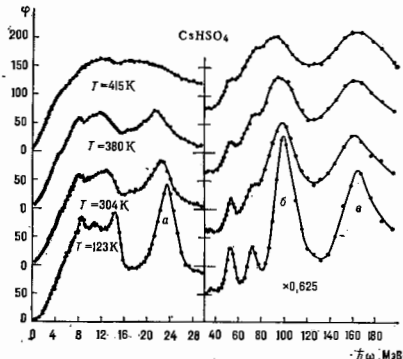


Рис. 2. Взаимная плотность фононных состояний  $\varphi$  в зависимости от энергии фононов при различных температурах.

С помощью некогерентного рассеяния изучаются также молекулярные вращения, диффузия протонов в металлах и т. д. Применение т. п. метода изотопич. контраста, состоящего в замене протона на дейтрон, позволяет исследовать динамику отд. частей сложных молекул и получать информацию о характере хим. связи в молекулах.

Н. р. и. в жидкостях. В отличие от фононов в кристаллах, коллективные возбуждения в жидкости (флуктуации плотности) ввиду отсутствия дальнего порядка и диффузия частиц быстро затухают (см. *Дальний и ближний порядок*). Поэтому  $S(Q, \omega)$  в жидкости не имеет ярко выраженных пиков при  $\omega = \pm \omega(Q)$ . Обычно проводят теоретич. расчёт ф-ции  $S(Q, \omega)$  для определённой модели коллективных возбуждений и, сопоставляя её с экспериментально измеренной, находят параметры модели.

Наиб. научены коллективные возбуждения в моноатомных жидкостях, как квантовых ( $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ), так и классических ( $\text{Ne}$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Na}$ ). Напр., в сверхтекучем  $^4\text{He}$  благодаря наличию дальнего порядка удалось наблюдать коллективные возбуждения в области импульсов  $Q \lesssim 2,5 \text{ \AA}^{-1}$  (рис. 3; см. *Сверхтекучесть*).

Некогерентное Н. р. и. в жидкости позволяет изучать характер диффузии частиц и их колебат. спектр.

Для анализа диффузии частиц в классич. жидкостях обычно используется гауссовое приближение для автокорреляц. ф-ции  $G_s(r, t)$ :

$$G_s(r, t) = [2\pi\Gamma(t)]^{-3/2} \exp(-r^2/2\Gamma(t)).$$

В этом приближении динамика частицы полностью описывается т. н. шириной ф-ции  $\Gamma(t)$ , имеющей смысл

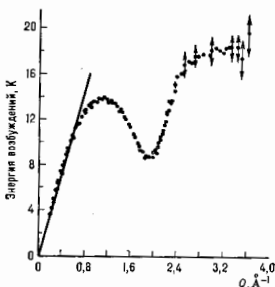


Рис. 3. Зависимость энергии коллективных возмущений  $\Gamma_0$  от волнового вектора  $Q$  в сверхтекучем гелии при  $T = 1$  К.

связывается т. н. шириной ф-ции  $\Gamma(t)$ , имеющей смысл среднего квадратического смещения частицы за время  $t$ :

$$\Gamma(t) = \frac{1}{3} \int_0^t dt' r^2 G_s(r, t').$$

Исследования с помощью Н. р. в. показывают сложный характер зависимости  $\Gamma(t)$ . В течение малых времён частицы движутся как в идеальном газе:  $\Gamma(t \rightarrow 0) \approx \approx \frac{1}{3} kT/M$ , а на протяжении больших времён выполняется классич. закон диффузии:  $\Gamma(t \rightarrow \infty) \approx 2Dt$ , где  $D$  — коэф. диффузии.

Некогерентное Н. р. в. используется также для изучения колебл. и вращат. спектров молекул в жидкостях и плотных газах (напр., в  $H_2O$ ).

**Магнитное неупругое рассеяние.** Магн. рассеяние нейтронов обусловлено взаимодействием магн. момента нейтрона с магн. моментами электронных оболочек атомов, молекул, электронов проводимости в металлах и

рассеяние вблизи магн. фазовых переходов. Одномагнитное рассеяние, как и однофононное, позволяет определить частоту  $\omega(Q)$  и затухание  $\Gamma(Q)$  магнона, величины магн. моментов магн. подрешеток. Рассеяние при температуре  $T \rightarrow T_c$  (критич. темп-ра) даёт возможность исследовать поведение критич. моды флуктуаций спиновой плотности, «замораживание»  $Q$ -рой определяет тип магн. дальнего порядка при  $T < T_c$  (см. *Спиновой плотности волны*).

Взаимодействие спинов с фононами может привести к появлению смешанных магно-фононных возбуждений и интерференции ядерного и магн. рассеяния. Исследование Н. р. в. в области гибридаизации магнона и фонона позволяет по величине расщепления оценить параметры спион-решеточного взаимодействия (рис. 4).

Лит.: Стреланин И. И., Гаврасов Л. В., Физика нейтронов низких энергий, М., 1965; Woods A. D. V., Cowley R. A., Structure and excitation of liquid helium, «Repts Progr. Phys.», 1973, v. 36, p. 1135; Динамические свойства твёрдых тел и жидкостей. Исследование методом рассеяния нейтронов, пер. с англ., М., 1980; Иванов Ю. А., Чернопольский Н. А., Нейтронная спектроскопия, М., 1983; Алексеев В. Л., Плянида Н. М., Стаженкович С., Рассеяние нейтронов светоспектроскопией, М., 1984; Уиндзор К., Рассеяние нейтронов от импульсных источников, пер. с англ., М., 1985.

**НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ** — самопроизвольное нарастание отклонений от невозмущённого квазистационарного состояния плазмы (состояния равновесия, стационарного течения и т. п.), связанное либо с пространств. неоднородностью плазмы, либо с неравновесным распределением по скоростям. С энергетич. точки зрения для возникновения Н. п. необходим нек-рый избыток свободной энергии (над термодинамическим равновесием) в невозмущённом состоянии плазмы.

В зависимости от того, в какой форме энергии (магн., механич., тепловой) образуется избыток свободной энергии и в каком виде и каким способом этот избыток высвобождается, различают разное вида Н. п.: пучковые, токовые, дрейфовые, магнитогибридные, кинетич., параметрич., дисперсионные, разрывные и др. Так, напр., если в разреженных плазмах невозмущённое состояние ионов и электронов описывается в виде суммы Максвелла распределения и дополнит. пучка ионов или электронов, движущегося со скоростью, превышающей нек-рое критич. значение (рис. 2), то в плазме возникает т. н. пучковые неустойчивости, к-рые приводят к самопроизвольному нарастанию плазменных волн с фазовыми скоростями, несколько меньшими скорости пучка. В бесстолкновит. плазме без магн. поля возбуждение ленгмюровских волн пучком электронов обусловлено взаимодействием с волной резонансных электронов пучка, скорости к-рых совпадают со скоростью распространения волны. Если волна распространяется с фазовой скоростью, меньшей скорости пучка, то число электронов, слегка обгоняющих волну и поэтому отдающих ей энергию, больше числа электронов, слегка отстающих от волны и отнимающих от неё энергию. В результате амплитуда волны нарастает. Резонансное взаимодействие частиц с волнами описывается кинетич. уравнениями, и поэтому Н. п. такого рода на к в е т и ч е с к и м и.

Будет ли волна затухать или нарастать при таком взаимодействии, зависит от знака производной ф-ции распределения резонансных частиц по скоростям  $\partial f/\partial v$ . При  $\partial f/\partial v < 0$  она затухает (Ландау затухание), а при  $\partial f/\partial v > 0$  — нарастает. Аналогично развиваются неустойчивости плазмы с током, когда невозмущённое состояние ионов и электронов описывается в виде суммы распределений Максвелла, сдвинутых друг относительно друга по оси скоростей на величину токовой скорости электронов. В результате кинетич. токовой неустойчивости возбуждаются ионно-звуковые волны в неадиабатич. плазме ( $T_e \gg T_i$ ), когда токовая скорость электронов превышает скорость ионного звука. Осн. следствие токовой Н. п. — быстрая передача импульса электро-

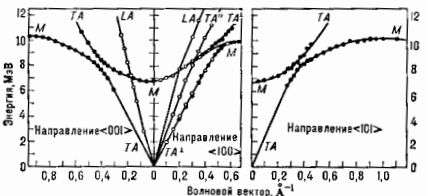


Рис. 4. Фононные и магнитная дисперсионные кривые в антиферромагнетике  $Fe_2$  при  $T = 4,2$  К. ТА — поперечный, LA — продольные акустические фононы, M — магноны.

т. д. (см. *Магнитная нейтронная спектроскопия*). Неупругое магн. рассеяние связано с рассеянием нейтронов на флуктуациях спиновой плотности, т. е. с коллективными возбуждениями спиновой системы. Это — *спиновые волны* (магноны) в магнитоупорядоченных средах, флуктуации намагниченности вблизи магн. фазовых переходов, возбуждения индивидуальных спинов (парамагн. рассеяние) или полных моментов  $J$ -электронов при переходах между уровнями, обусловленными взаимодействием с внутрискристаллич. электрич. полем.

Наиб. полно изучены одномагнитное рассеяние при низких темп-рах в ферро- и антиферромагнетиках и

нов колебаниям плазмы и непосредственно понам, т. е. возникновению *эмодавного сопротивления* плазмы.

Анизотропия  $f$ -ной распределения частиц плазмы в пространстве скоростей является также причиной анизотропных Н. п. Такая анизотропия возникает в плазме, помещённой в магн. поле, в  $k$ -ром характер движения частиц в направленных вдоль и поперёк магн. силовых линий совершенно различен (см. *Плазма*). В частоту, давление плазмы вдоль и поперёк магн. поля могут сильно различаться. Если давление плазмы вдоль магн. силовых линий существенно превышает как давление магн. поля, так и давление поперёк магн. силовых линий, то плазма окажется неустойчивой по отношению к самопроизвольному нарастанию первоначально малого изгиба магн. силовых линий под действием центробежной силы, возникающей при тепловом движении частиц вдоль искривлённых силовых линий. Это Н. п. наз. *пл а з м а* в о в о й по аналогии с известными изгибными колебаниями плазгаза с большим напором воды. Поскольку развитие плазмовой Н. п. не связано с наличием групп резонансных частиц, то она существует и в столкновит. плазме, описываемой ур-ниями *магнитной гидродинамики*, и поэтому относится к широкому классу МГД Н. п.

Если анизотропия давления плазмы невелика или  $f$ -ный распределения частиц по продольным (по отношению к магн. полю) и поперечным скоростям различаются мало, то изгибные (альвеновские) волны в плазме возбуждаются вследствие взаимодействия группы резонансных частиц с волной и Н. п. является кинетической (см. *Взаимодействие частиц с волнами*). Развитие неустойчивости в этом случае происходит за счёт перевода части энергии движения частиц вдоль магн. поля в энергию циклотронного движения вследствие циклотронного резонанса частиц с волной с учётом доплеровского сдвига частоты. В этом смысле такие Н. п. наз. *циклотронными*.

Равновесные МГД-конфигурации могут обладать избытком свободной энергии в виде энергии магн. поля и энергии теплового расширения плазмы. Это т. н. *конфигурационный избыток* свободной энергии. Высвобождение избытка энергии магн. поля при перестройке конфигурации является источником набб. быстро развивающейся неустойчивости МГД Н. п. Примером может служить токовая неустойчивость плазменного шнура, сжатого магн. полем протекающего по нему тока (наблюдается при *пучк-эффекте*). Набб. радиальным методом стабилизации конфигураций подобного типа является наложение достаточно сильного продольного магн. поля:  $H_z > H_{\phi} \lambda / 2gr$ , где  $H_{\phi}$  — магн. поле соств. тока;  $r$  — радиус плазменного шнура,  $\lambda$  — продольная длина волны возмущения. Высвобождение конфигурац. избытка энергии при тепловом расширении плазмы связано с *желобковой неустойчивостью*,  $k$ -рая представляет собой возмущения в виде вытянутых вдоль силовых линий магн. поля языков, расширяющихся поперёк силовых линий в сторону ослабевающего магн. поля. Возмущения подобного типа приобретают характер перестановки целых элементарных силовых трубок магн. поля, заполненных плазмой. Желобковая Н. п. является МГД-аналогом *конвективной неустойчивости* в обычной гидродинамике.

Поскольку плазма, как сплошная среда, представляет собой систему с бесконечным числом степеней свободы, полней теоретич. анализ её устойчивости по отношению к разному виду возмущений практически неосуществим. Общепринятый подход к физике устойчивости плазмы состоит в последоват. рассмотрении разл. Н. п., начиная с самых простых моделей — гидродинамических, с постепенным усложнением (вводя в рассмотрение эффекты конечной диссипации, многокомпонентность плазмы, кинетич. эффекты и т. п.).

Набб. исследованы Н. п. относительно малых возмущений, описываемые в теории плазмы линейными ур-ниями. В задачах о Н. п. равновесных МГД-конфигу-

раций линейные дифференциальные ур-ния теории устойчивости идеально проводящей плазмы можно привести к одному ур-нию движения,

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\xi \mathcal{L}, \quad (1)$$

в  $k$ -ром  $\mathcal{L}$  — нек-рый линейный самосопряжённый дифференц. оператор, действующий на  $\xi$  (смещение плазмы от равновесия) как  $f$ -ию координат. Ур-ние (1) аналогично ур-нию, описывающему колебания произвольной неоднородной упругой среды, где  $\mathcal{L}$  играет роль соответствующего обобщённого коэф. упругости. По аналогии с механикой упругих сред, вводится потенциальная энергия малых колебаний

$$\delta W = \frac{1}{2} \int \xi \mathcal{L} \xi dv. \quad (2)$$

Если при всех смещениях  $\xi(r)$  энергия системы увеличивается ( $\delta W > 0$ ), то система находится в устойчивом состоянии с наименьшей потенциальной энергией и все отклонения от положений равновесия не могут нарастать во времени. Если  $\delta W$  может принимать отрицательные значения, т. е. при нек-ром смещении система может перейти в состояние с меньшей потенциальной энергией, то рассматриваемая система неустойчива. Границу между устойчивыми и неустойчивыми состояниями образуют такие состояния, в  $k$ -рых исчезает упругость по отношению к одному определённом типу смещений. Для нахождения границы устойчивости обычно исследуют, при каких условиях появляются состояния, близкие к равновесному, с помощью ур-ния  $\mathcal{L} \xi = 0$ , т. е. соответствующие нулевым соств. частотам (т. н. безразличное равновесие). В линейной теории Н. п. стационарных состояний нарастание флуктуаций во времени носит экспоненциальный характер  $\sim \exp(\gamma t)$ . Здесь  $\gamma$  — *инкремент* неустойчивости — величина, характеризующая степень неустойчивости системы, быстроту возбуждения в ней колебаний. Порядок величин инкремента самых быстрых МГД-неустойчивостей  $\sim v/\tau$ , где  $v$  — характерный пространств. размер конфигурации,  $v$  — характерная скорость (альвеновская, либо скорость звука, в зависимости от типа Н. п.).

Часто состояния плазмы (равновесные конфигурации и течения), заведомо устойчивые в рамках идеальной гидродинамич. рассмотрения, при учёте диссипативных эффектов (ковечного электрич. сопротивления, вязкости, теплопроводности и т. д.) оказываются неустойчивыми (т. н. *диссипативные* Н. п.).

Учёт неидеальности плазмы приводит к существенно сниженному порогу возникновения неустойчивости МГД конфигураций и течений плазмы. Диссипативные Н. п. характеризуются существенно меньшими инкрементами и имеют характер более «медленного просачивания» (тем медленнее, чем меньше электрич. сопротивление) по сравнению с бурной перестройкой исходной конфигурации при неустойчивости идеальной плазмы. Аналогом диссипативных Н. п. в обычной гидродинамике является неустойчивость течения Пуазейля. При наличии магн. поля новым важным типом указанных Н. п. являются *ра з а р з в и м* е неустойчивости (*турбулентно-неустойчивости*), сопровождающиеся изменением топологии магн. поля (разрыв *пл пересоединения* силовых линий). Простейшим примером разрывной Н. п. служит неустойчивость плоского слоя плазмы с током, создающим конфигурацию с обратными магн. полем (т. е. противоположно направленным по обе стороны слоя, см. *Нейтральная токовая слой*). Если представить токовый слой в виде набора токовых нитей, то очевидно, что из-за притяжения нитей с одинаковым направлением тока они имеют тенденцию к попарному पिичиванию (слипанию). При этом происходит перестройка конфигурации магн. поля: незамкнутые силовые линии плоского токового слоя в результате पिичивания частично разрываются на куски и замыкаются вокруг образовавшихся токовых нитей. Хотя такая перестрой-

ка энергетически выгодна, в идеальной плазме она не осуществляется из-за ограниченности магн. силовых линий в плазму. Наличие конечного сопротивления плазмы нарушает эвменожность, поволяя магн. силовым линиям противоположного направления диффундировать навстречу друг другу сквозь плазменный слой и пересечься.

Многокомпонентность плазмы также приводит к дополнительным Н. п., наиболее важным среди к-рых является широкий класс дрейфовых Н. п. Источником свободной энергии здесь служит тепловая энергия плазмы, удерживаемой магн. полем. Вследствие неоднородности давления плазмы электроны и ионы дрейфуют в разные стороны со скоростью в  $r/R$  раз меньшей, чем тепловая скорость ионов ( $r_H$  — средний ларморовский радиус ионов), и т. о. создают слабый ток в плазме, возбуждающий т. п. дрейфовые волны. Как правило, характерные инкременты дрейфовых Н. п. по крайней мере в  $r/R$  раз меньше идеальных МГД неустойчивостей. Многие дисперсионные МГД Н. п. имеют свои аналоги в бестолковой плазме, где диссипация энергии обусловлена взаимодействием плазменных волн с группой резонансных частиц.

Параметрические Н. п. При распространении в плазме волны большой амплитуды происходит периодич. пространственно-временная модуляция параметров плазмы. На этом фоне возникает параметрич. связь волн малой амплитуды (пробных волн), амплитуда к-рых возрастает экспоненциально в результате раскачивания колебаний электронов и ионов волнами большой амплитуды. Возникают т. н. параметрические неустойчивости. Примером может служить распадная неустойчивость плазмы, в к-рой волна конечной амплитуды с частотой  $\omega_0$  и волновым вектором  $k$  распадается на две волны того же или другого типа с меньшими частотами, удовлетворяющими условиям резонанса:  $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$ ,  $k_0 = k_1 + k_2$ .

Другим важным примером Н. п. этого типа является модуляционная неустойчивость волны с амплитудой, превышающей некоторую критическую, в результате которой самопроизвольно возникает её НЧ-модуляция.

Ответ на кардинальный вопрос — о конечной судьбе состояния плазмы в результате развития Н.п. — выводит за рамки линейной теории Н. п. Как правило, учёт нелинейных эффектов останавливает первоначально экспоненциальный рост Н. п. на уровне насыщения. Универсального подхода для описания состояния насыщения Н. п. не существует. В ряде случаев разработаны приближенные нелинейные модели. Н. п. исходных состояний, лежащих далеко за порогом неустойчивости, приводят к турбулентному состоянию насыщения. Так, напр., пучковые Н. п. могут приводить к состоянию турбулентности плазменных волн. При этом насыщение роста волн может быть связано как с нелинейным взаимодействием, так и с постепенной эволюцией состояния плазмы к устойчивому под действием возбужденных колебаний.

Если Н. п. дополнительно дестабилизируются нелинейными эффектами, то скорость нарастания таких Н. п. увеличивается с ростом амплитуды возмущения (до некоего предела) — это т. н. вараиансы неустойчивости. В неравновесной плазме могут существовать волны с отрицательной энергией (напр., при наличии пучков частиц), когда энергия плазмы при наличии в ней волны ниже, чем в её отсутствие. В таком случае увеличение амплитуд группы взаимодействующих волн с разными знаками энергии может быть энергетически выгодным, т. к. ведёт к уменьшению энергии плазмы. Усиление взаимодействия с увеличением амплитуд волн является причиной их варьированного роста.

Прогресс в изучении Н. п. в значит. степени был связан с работами по проблеме УТС, в результате чего

удалось реализовать практически устойчивые конфигурации горячей плазмы в магн. поле (см. Токамак).

Н. п. аннотропного типа обнаружены в магнитосфере Земли. Они играют важную роль в динамике радиационных поясов, частицы к-рых представляют собой аннотропную в магн. поле компоненту плазмы.

Пучковые Н. п., сопровождающиеся генерацией лентморовских колебаний, представляют интерес для плазменной электроники, а в проблеме УТС используются в методах нагрева плазмы, основанных на инжекции пучков заряд. частиц.

О неких-рых типах неустойчивости низкотемпературной плазмы см. в ст. Низкотемпературная плазма, Плазма электроприводных газов.

Лит.: Михалковский А. В., Теория плазменных неустойчивостей, 2 изд., т. 1—2, Москва, 1975—77; Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З., Физика плазмы для физиков, М., 1979; Основы физики плазмы, под ред. А. А. Галева, Р. Судана, т. 1—2, М., 1983—84. Р. З. Сагдеев, А. А. Галева.

**НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ И ВОЛНОВЫХ СИСТЕМАХ** — самопроизвольное нарастание возмущений на фоне заданного движения, приводящее к качественному изменению поведения системы. Простейший пример неустойчивого состояния — равновесие маятника в верх. точке (рис. 1). Любое сколь угодно малое возмущение маятника приводит к его уходу от состояния равновесия. Физическая неустойчивость движения системы означает, что состояние равновесия может быть реализовано лишь приблизительно и на ограничен. интервале времени (для волновых систем — и пространства), тем меньше, чем выше скорость нарастания возмущений. Состояния или движения системы, малые нач. возмущения к-рых остаются малыми и в дальнейшем, наз. устойчивыми. Примерами являются соответственно состояние равновесия маятника в ниж. точке и само колебат. движение маятника.

Понятия неустойчивости и устойчивости движения относятся ко всем динамическим

Рис. 1. Маятник с жестким подвесом.

системам, а не только к колебательным и волновым. Строгая формулировка понятия устойчивости, пригодная для любых систем, затруднительна, поэтому, как правило, учитывается специфика задачи. Так, различают устойчивость движения в «малом» — по отношению к бесконечно малым возмущениям и в «большом» — по отношению к возмущениям конечной величины, устойчивость по отношению к определ. классу возмущений и т. д. Наб. изучена устойчивость в «малом», т. е. при малых возмущениях возможно различение по ним в окрестности исследуемого движения исходных ур-ний, описывающих систему (см. Устойчивость движения, Устойчивость равновесия). Специфика колебательных и волновых систем заключается лишь в характере движений в системе и в характере нарастающих при неустойчивости возмущений, а также в физ. механизмах Н. п. в к. и в. с. Одной из осн. стадий изучения поведения колебательных и волновых систем является отыскание простых характерных состояний и движений: состояний равновесия и периодич. режимов в колебательных системах или стационарных и автономных режимов в волновых системах. Затем исследуется их устойчивость как условие реализуемости. В случае неустойчивости движения анализируются характер нарастающих возмущений, закон и скорость их нарастания, а также механизмы неустойчивости. Традиционно разделяют неустойчивость «тривиальных» состояний системы (состояний равновесия в пространственно однородных стационарных режимах) и неустойчивость колебаний и волн. В первом случае речь идет о зарождении колебательных и волновых движений из состояния покоя, а во



втором — о разрушении существующих в системе колебательных и волновых процессов. Нарастание возмущений на фоне неустойчивого движения может происходить в виде колебаний или волн либо апериодически. Поступление энергии к нарастающим периодическим возмущениям при Н. в к. и в. с. может идти двумя способами — автоколебательным и резонансным (см. Автоколебания). При автоколебательной неустойчивости возмущения растут за счёт энергии источников неколебательной природы. Резонансное нарастание возмущений обусловлено оборотом ими энергии от к.-л. периодических источников или движений системы. Основные особенности Н. в к. и в. с. могут быть продемонстрированы на примере матем. маятника. Движение его в отсутствие диссипации описыва-

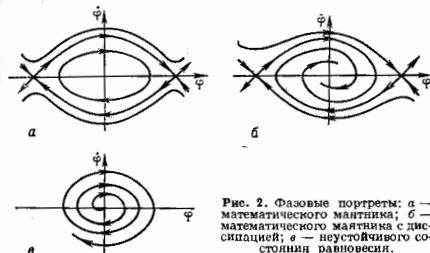


Рис. 2. Фазовые портреты: а — математического маятника; б — математического маятника с диссипацией; в — неустойчивого состояния равновесия.

ется уравнением  $\ddot{\varphi} + \sin\varphi = 0$ . Замкнутые траектории на рис. 2, а отвечают периодич. незатухающим колебаниям. При введении в систему малой диссипации и соответственно в у-рне осциллятора члена  $\alpha\dot{\varphi}$  ( $\alpha > 0$ ) колебания станут затухающими и замкнутые траектории на фазовой плоскости превратятся в скручивающиеся спирали (рис. 2, б). Если возможно поступление энергии к колебаниям, то они будут нарастать. Подталкиван маятник с периодом его собств. колебаний, можно получить резонансное возбуждение колебаний. Представим теперь, что воздействие на маятник зависит от характера его колебаний благодаря механизму обратной связи, обеспечивающему поступление энергии в нужной фазе, пропорциональное, напр., величине  $\dot{\varphi}$ . Формально это соответствует введению в систему отрицат. диссипации  $\alpha\dot{\varphi}$  ( $\alpha < 0$ ). Тогда состояние равновесия  $\varphi = \dot{\varphi} = 0$  существует, но оно неустойчиво — сколь угодно малое отклонение от указанной точки приведёт к раскату колебаний. Фазовые траектории в окрестности состояния равновесия имеют при этом вид скручивающихся спиралей (рис. 2, в). Т. к. частота и фаза поступления энергии к колебаниям определяются собств. движением осциллятора, то источник энергии может быть неколебательным. Это пример автоколебат. неустойчивости. Автоколебат. неустойчивость, ограниченная величинными эффектами, приводит, как правило, к установлению стационарных автоколебаний. В более сложных системах с размерностью фазового пространства, не меньшей трёх, неустойчивость может привести к возникновению *стохастических колебаний*. Наряду с механизмом положит. обратной связи к автоколебат. неустойчивости приводит существование падающего участка на характеристике зависимости силы трения в осцилляторе от скорости движения. Так происходит, напр., возбуждение струны движущимся смычком. Зависимость силы трения от относит. скорости движения смычка и струны показана на рис. 3. Выбранной скорости движения смычка  $v_0$  отвечает сила  $F_0$ , к-рая уравновешивается натяжением струны. Легко, однако, заметить, что указанное состояние равновесия неустойчиво. Появление скорости движения струны, напр., в направлении движения

смычка означает уменьшение относит. скорости смычка и струны и соответственно вызывает нарастание силы трения F. Это ведёт к уходу от состояния равновесия. В результате возникают нарастающие колебания струны, что следует из энергетич. баланса. Действительно, работа силы трения за период движения струны положительна: в те полпериода, что струна движется со смычком, сила трения больше, чем при встречном их движении. С автоколебат. неустойчивостью связана работа генераторов периодич. колебаний (механич., акустич., эл.-магн. и т. д.). В частности, в механич. часах потери на трение компенсируются при помощи инерционного механизма за счёт энергии пружины. Электрич. колебания генерируются в колебат. контуре за счёт энергии батареи либо при помощи триода с выключенным контуром в цепь его управляющего электрода (обратная связь), либо при включении в контур туннельного диода — элемента с падающим участком вольт-амперной характеристики.

Примером др. типа неустойчивости — резонансной — может служить параметрич. неустойчивость маятника. Если с частотой, вдвое большей частоты маятника, менять длину подвеса, то состояние равновесия ( $\varphi = \dot{\varphi} = 0$ ) и в этом случае оказывается неустойчивым. Именно так возникает раскату качелей, если вставать при прохождении ниж. точки траектории (см. Параметрический резонанс, Параметрическая генерация и усиление электромагнитных колебаний). Нарастание колебаний маятника при периодическом изменении длины его подвеса может быть рассмотрено и с др. точки зрения — как пример неустойчивости периодических колебаний. При замене жёсткого подвеса маятника упругим система приобретает дополнит. степень свободы, соответствующую вертикальным колебаниям. При произвольном соотношении частот вертикальные и горизонтальные колебания могут происходить практически независимо. Напр., возможны незатухающие вертикальные колебания груза на пружине. При выполнении условия параметрич. резонанса два типа колебаний начинают эффективно взаимодействовать, что в рассматриваемом случае приводит к раскату горизонтальных колебаний за счёт энергии вертикальных. При этом вертикальные колебания в системе оказываются неустойчивыми по отношению к возбуждению горизонтальных.

Проявления неустойчивости в колебат. системах с конечным числом степеней свободы в осн. аналогичны рассмотренным на примере маятника. Пронзление неустойчивости в волновых системах имеет особенности, обусловленные пространств. протяжённостью этих систем. Как и в колебат. системах, неустойчивость волновых движений и консервативных волновых системах является резонансной и связана с нелинейным взаимодействием волн, напр. трёх-, четырёх- и т. д. волновые взаимодействия, возникающие в нелинейных средах при выполнении условий синхронизма, самовоздействие волн (самодулировка, самофокусировка) и др. В активных волновых системах неустойчивость может иметь как автоколебательный, так и резонансный характер. Примерами активных волновых систем являются лазеры, гиротроны, волновые пучки в плазме, химически активные среды. При автоколебат. неустойчивости волновые возмущения нарастают за счёт энергии неколебат. источников, напр. пучков частиц или течений. В отличие от колебат. систем нарастание возмущений в таких системах может происходить не только во времени, но и в пространстве. В частности, возмущение может носить

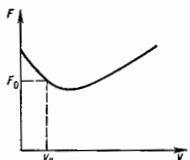


Рис. 3. Зависимость силы трения F между смычком и струной от их относительной скорости v.

характер бегущего волнового пакета нарастающей амплитуды и уходит из области своего зарождения. После прохода бегущего возмущения через элемент системы, от которого оно отбирает энергию, поле возмущений в этой области может с течением времени стремиться к нулю. Это т. н. конвективная (силовая) неустойчивость. Если же возмущения нарастают с течением времени во всех точках пространства, то неустойчивость является абсолютной. Системы, в которых реализуется конвективная неустойчивость, служат основой для создания усилителей, а системы с абс. неустойчивостью являются генераторами. Существуют критерии определения характера неустойчивости в волновых системах. Однако во многих реальных системах разделение на абсолютную и конвективную неустойчивость невозможно. В частности, либо замыкая отрезок конвективной неустойчивой системы в кольцевую систему, либо включая внеш. обратную связь, получают систему с абс. неустойчивостью (см. *Автомолы, Волны, Неустойчивые системы* и др.).

Лит.: Андронов А. В., Вит А. А., Хайкин С. Э., Теория колебаний, 3 изд., М., 1981; Бутченко В. П., Насладкин Ю. И., Фролов Н. А., Введение в теорию нелинейных колебаний, 2 изд., М., 1987; Федоренко А. М., Коцаренко Н. Я., Абсолютная и конвективная неустойчивость в плазме и твердых телах, М., 1981; Рабинович М. И., Трубецкой Д. И., Введение в теорию колебаний в волн, М., 1984. А. Я. Васильев, А. А. Новиков.

**НИЗКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ** (криогенные температуры) — обычно темп-ры, лежащие ниже точки кипения жидкого воздуха (ок. 80 К). Согласно рекомендации, принятой 13-м конгрессом Междунар. ин-та холода (1974), криогенными темп-рами следует называть темп-ры ниже 120 К.

Получение Н. т. для получения и поддержания Н. т. обычно используют сжиженные газы (хладагенты). В сосуде Дьюара, содержащем сжиженный газ, испаряющийся под атм. давлением, достаточно хорошо поддерживается пост. темп-ра  $T_n$  кипения хладагента. Практически применяют след. хладагенты, воздух ( $T_n \approx 80$  К), азот ( $T_n = 77,4$  К), неон ( $T_n = 27,1$  К), водород ( $T_n = 20,4$  К), гелий ( $T_n = 4,2$  К). Для получения жидких газов служат спец. установки — окислители, в к-рых сильно сжатый газ при расширении до обычного давления охлаждается и конденсируется (см. *Джоуль—Томсона эффект*).

Откачивая испаряющийся газ из термостат. сосуда, можно уменьшать давление над жидкостью и тем самым понижать темп-ру её кипения. Естествен. или принудит. конвекция и хорошая теплопроводность хладагента обеспечивают при этом однородность темп-ры во всем объеме жидкости. Таким путем удается перекрыть широкий диапазон темп-р: от 77 до 63 К при помощи жидкого азота, от 27 до 24 К — жидкого неона, от 20 до 14 К — жидкого водорода, от 4,2 до 1 К — жидкого гелия. Методом откачки нельзя получить темп-ры ниже *тройной точки* хладагента. При более низких темп-рах вещество затвердевает и теряет свои качества хладагента. Промежуточные темп-ры, лежащие между указанными выше интервалами, достигаются спец. методами. Охлаждаемый объект теплоизолируют от хладагента, помещая его, напр., внутрь вакуумной камеры, погружая в сжиженный газ. При небольшом контролируемом выделении теплоты в камере (в ней имеется электрич. нагреватель) темп-ра исследуемого объекта повышается по сравнению с темп-рой кипения хладагента и может поддерживаться с высокой стабильностью на требуемом уровне. В др. способе получения промежуточных темп-р охлаждаемый образец помещают над поверхностью испаряющегося хладагента и регулируют скорость испарения жидкости нагревателем. Отвод теплоты от исследуемого объекта здесь осуществляет поток испаряющегося газа. Применяется также метод охлаждения, при к-ром холодный газ, получаемый при испарении хладагента, прогоняется через теплообменник, входящий в тепловой контакт с охлаждаемым объектом.

Гелий при атм. давлении остается жидким вплоть до абс. нуля темп-ры (см. *Гелий жидкий*). Однако при откачке паров жидкого  $^4\text{He}$  (природного изотопа гелия) обычно не удается получить темп-ру существенно ниже 1 К, даже применяя очень мощные насосы (этому мешают чрезвычайно малая упругость насыщ. паров  $^4\text{He}$  и его сверхтекучесть). Откачкой паров азота  $^3\text{He}$  ( $T_n = 3,2$  К) удается достичь темп-р  $\sim 0,3$  К. Область темп-р ниже 0,3 К наз. сверхнизкими темп-рами. Методом адиабатич. размагничивания парамагн. солей (см. *Магнитное охлаждение*) удается достичь темп-р  $\sim 10^{-6}$  К. Тем же методом с использованием ядерного парамагнетизма в системе атомных ядер были достигнуты темп-ры  $\sim 10^{-8}$  К. Принципиальную проблему в методе адиабатич. размагничивания (как, впрочем, и в др. методах получения Н. т.) составляет осуществление хорошего теплового контакта между объектом, к-рый охлаждают, и охлаждающей системой. Особенно это трудно достигнимо в случае системы атомных ядер. Совокупность ядер атомов можно охладить до сверхнизких темп-р, но добиться такой же степени охлаждения вещества, содержащего эти ядра, не удается.

Для получения темп-р порядка неск. мК широко пользуются более удобным методом — растворением жидкого  $^3\text{He}$  в жидком  $^4\text{He}$ . Применяют для этой цели рефрижераторы растворения (см. *Криостат*). Их действие основано на том, что  $^3\text{He}$  сохраняет конечную растворимость (ок. 6%) в жидком  $^4\text{He}$  вплоть до абс. нуля темп-ры. Поэтому при сопряжении почти чистого жидкого  $^3\text{He}$  с разбавленным раствором  $^4\text{He}$  в  $^4\text{He}$  атомы  $^3\text{He}$  переходят в раствор. При этом поглощается теплота растворения и темп-ра раствора понижается. Растворение осуществляется в одном месте прибора (в камере растворения), а удаление атомов  $^4\text{He}$  из раствора путем откачки — в другом (в камере испарения). При непрерывной циркуляции  $^4\text{He}$ , осуществляемой системой насосов и теплообменников, можно поддерживать в камере растворения темп-ру 10—30 мК неограниченно долго. Гелий  $^3\text{He}$  можно охладить ещё сильнее, используя *Померанчу эффект*. Жидкий  $^3\text{He}$  затвердевает при давлении более  $3 \cdot 10^6$  Па. В области темп-р ниже 0,3 К увеличение давления (в пределе до  $3,4 \cdot 10^8$  Па) сопровождается поглощением теплоты и понижением темп-ры равновесия смеси жидкой и твердой фаз (затвердевание идет с поглощением теплоты). Этим методом были достигнуты темп-ры  $\sim 1-2$  мК.

**Измерение Н. т.** Первичным прибором для измерения термодинамич. темп-ры вплоть до 1 К служит газовый термометр. Др. вариантами первичного термометра являются акустич. и шумовой термометры, действие к-рых основано на связи термодинамич. темп-ры соответственно со значением скорости звука в газе и с интенсивностью тепловых флуктуаций напряжения в элентрич. цепи. Первичные прецизионные термометры используют в осн. для определения темп-р легко воспроизводимых фазовых равновесий в однокомпонентных системах (т. н. реперных точек), к-рые служат опорными температурными точками *Международной практической температурной шкалы* (МПТШ-68).

Для измерения темп-р от 630,74 °С до 13,81 К по МПТШ-68 с точностью  $\sim 0,001$  К служит платиновый термометр сопротивления. МПТШ-68 пока не проделана ниже 13,8 К ввиду отсутствия в этой области Н. т. второго термометра, не уступающего по чувствительности, точности и воспроизводимости показаниям платиновому термометру сопротивления при более высоких темп-рах. В диапазоне 0,3—5,2 К низкотемпературная термометрия основана на зависимости давления насыщ. паров  $p_s$  гелия от темп-ры, устанавливаемой газовым термометром. Эта зависимость была принята в качестве междунар. температурной шкалы в области 1,5—5,2 К (шкала  $^4\text{He}$ , 1958) и 0,3—3,3 К (шкала  $^3\text{He}$ , 1962). Зависимость  $p_s(T)$  в этих температурных диапазонах не может быть представлена простой аналитич. ф-лой и поэтому табулируется; табличные данные обеспечи-

вают точность определения температуры до тысячной доли К.

В области Н. т. для целей практич. термометрии применяют гл. обр. термометры сопротивления (до 20 К — медный; в области водородных и гелиевых темп-р вплоть до 1 мК — угольные, сопротивление к-рых возрастает при понижении темп-ры). Для измерения темп-ры ниже 100 К применяют также термометры сопротивления из чистого германия.

Ниже 1 К газовым термометром пользоваться практически нельзя. Для определения термодинамич. темп-ры в этой области используют методы *магнитной термометрии* и ядерные методы. В основе ядерных методов измерения Н. т. лежит принцип квантовой статистики. физики, согласно к-рому равновесная заселённость дискретных уровней энергии системы зависит от темп-ры. В одном из таких методов измеряются интенсивности линий *ядерного магнитного резонанса*, определяемые разностью заселённостей уровней энергии ядер в магн. поле; в др. методе — зависящее от темп-ры отношение интенсивностей компонентон, на к-рые расщепляется линия резонансного гамма-излучения (см. *Мессбауэровская спектроскопия*) во внутр. магн. поле ферромагнетика.

Аналогом термометрии по давлению насыщенных паров в области сверхнизких температур является измерение температуры в диапазоне 30—100 мК по осмотическому давлению  $^3\text{He}$  в смеси  $^3\text{He}$  —  $^4\text{He}$ . Абсолютная точность измерений — ок. 2 мК при чувствительности осмотич. термометра  $\sim 0,01$  мК.

Физика Н. т. Применение Н. т. сыграло важную роль в изучении конденсат. состояний вещества. Особенно много новых фактов и закономерностей было открыто при изучении свойств разл. веществ при гелиевых темп-рах. Это привело к выделению спец. раздела физики — физики Н. т. При понижении темп-ры в своих веществах начинают проявляться особенности, связанные с наличием взаимодействий, к-рые при обычных темп-рах нивелируются тепловым движением атомов.

Благодаря значит. подавлению теплового движения атомов при Н. т. удалось обнаружить большое число макроскопич. явлений, имеющих квантовую природу: существование гелия в жидком состоянии вплоть до абс. нуля темп-ры (0К), *сверхтекучесть*, *сверхпроводимость* и др. При Н. т. состояние твёрдого тела можно рассматривать как упорядоченное состояние, соответствующее 0К, но с учётом влияния «газа» элементарных возмущений — *квазичастиц*. Введение разл. типов квазичастиц (*фононы*, *дырки*, *магноны* и др.) позволяет описать многообразие свойств веществ при Н. т.

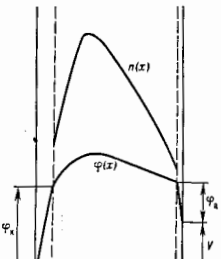
Охлаждение до сверхнизких темп-р применяется в ядерной физике, напр. для создания мишеней и источников с поляризов. ядрами при изучении анизотропии рассеяния элементарных частиц.

Технические применения Н. т. Одна из гл. областей применения Н. т. в технике — разделение газов. Произ-во кислорода и азота в больших кол-вах основано на сжижении воздуха с последующим разделением его на ректификац. колоннах. Н. т. используют для получения высокого *вакуума* методом адсорбции на активиров. угле или цеолите (адсорб. насос) или непосредственно конденсацией паров на металлич. стенках сосуда с хладагентом (крионасос). Охлаждение до темп-р жидкого воздуха или азота находит применение в медицине (лечение мозговых опухолей, консервация живых тканей). Широко применяются Н. т. в электронике и радиотехнике для подавления аппаратурных шумов.

*Лит.*: Физика низких температур, пер. с англ., М., 1959; Справочник по физико-техническим основам криогеники, под ред. М. П. Малкова, 3 изд., М., 1985; Л и т о н с, Сверхпроводимость, пер. с англ., 2 изд., М., 1971; Роу э н и с А., Техника низкотемпературного эксперимента, пер. с англ., М., 1966; М е н д е л с о н К., На пути к абсолютному нулю, пер. с англ., М., 1974; Л о у н а с д а О. В., Принципы и методы получения температур ниже 1 К, пер. с англ., М., 1977; К о в ц и ц а П. Л., Научные труды. Физика и техника низких температур, М., 1989.

И. П. Крымлов.

**НИЗКОВОЛЬТНАЯ ПЛАЗМА** — несамостоят. дуговой разряд с термоэмиссионным катодом, горящий при напряжении  $U_0$  меньше не только потенциала ионизации, но и наименьшего потенциала возбуждения газа  $U_1$ . Во Д. обычно горит при малых давлениях  $p$  и межэлектродном расстоянии  $d$  ( $pd < 10$  тор·см). Плазма Н. д., как правило, ионизована слабо. Распределение по потенциалу  $\varphi(x)$  и концентрации плазмы  $n(x)$  в Н. д. немонотонны с максимумами в прикатодной области плазмы. Положит. столб в разряде практически отсутствует. Квазинейтральная плазма Н. д. отделена от электродов прикатодным  $\varphi_K$  и прианодным  $\varphi_A$  падениями напряжения в приэлектродных легмгоровских слоях  $L_K$  и  $L_A$  (рис.). При большой электронной эмиссии с катода и сравнительно малой концентрации плазмы в прикатодной области в легмгоровском слое у катода возникает минимум потенциала — т. е. *виртуальный катод*, ограничивающий эмиссию с катода до величин порядка хаотического электронного тока в прикатодной плазме.



Распределение потенциала и концентрации плазмы в межэлектродном промежутке низковольтной дуги.

Направленный ток в плазме Н. д. переносится в осн. электронами и имеет две направленные навстречу друг другу полевую и диффузионно-составляющие. Ионизация атомов, как правило, ступенчатая и осуществляется в осн. высокоэнергичными электронами плазмы из «хвоста» максвелловского распределения и отчасти электронами катодной эмиссии, ускоренными на прикатодном падении.

Известны т. н. *кванденовские Н. д.*, горящие при весьма малых  $pd$ , когда длина свободного пробега электронов катодной эмиссии превышает зазор Д. Ионизация и ионденовские Н. д. также осуществляются в осн. тепловыми электронами, ускоренными обычно в коллективных процессах, в частности в электрич. полях легмгоровских колебаний, возбуждаемых за счёт плазменно-лучевого взаимодействия (см. *Плазменно-лучевой разряд*). Наиб. изучены Н. д. в парах щелочных металлов и в инертных газах.

Н. д. используются в *термоэмиссионных преобразователях* тепловой энергии в электрическую и в термоэмиссионных ключевых элементах. Иногда типичные для Н. д. распределение потенциала и плотности плазмы, характеризующиеся максимумами в прикатодной квазинейтральной плазме, образуются у катода самостоятельно дугового разряда. Эту область, расположенную между катодом и положит. столбом разряда, часто наз. *пространством Н. д.*

*Лит.*: Г р а н о в с к и й В. Л., Электрический ток в газе, М., 1971; Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма, под ред. В. Я. Мойжеса, Г. Е. Шукма, М., 1973; В а к и т Ф. Г., Ю р ь в В. Г., Низковольтная дуга с накаленным катодом в парах щелков. Обзор, СЭТФ, 1976, т. 48, с. 405; Математические моделирование процессов в низковольтном плазменно-лучевом разряде, М., 1980.

Ф. Г. Бахит, В. Г. Юрьев.

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

Содержание:

1. Общие свойства Н. п. . . . . 351
2. Сущность создания Н. п. . . . . 352
3. Процессы в Н. п. . . . . 352
4. Нестойчивости и структуры Н. п. . . . . 353
5. Применение Н. п. . . . . 354
6. Н. п. земной атмосферы и Солнца. . . . . 355

## 1. Общие свойства Н. п.

Низкотемпературной наз. плазму, у к-рой ср. энергия электронов меньше характерного потенциала ионизации атома ( $< 10$  эВ); темп-ра её обычно не превышает  $10^4$  К. Плазма с более высокой темп-рой наз. горячей или высокотемпературной. Обычно Н. п. слабоионизованная, т. е. число нейтральных атомов и молекул значительно превышает число заряд. частиц — электронов и ионов. Отношение числа ионизов. атомов к полному их числу в единице объёма наз. степенью ионизации плазмы. Поскольку кулоновое взаимодействие

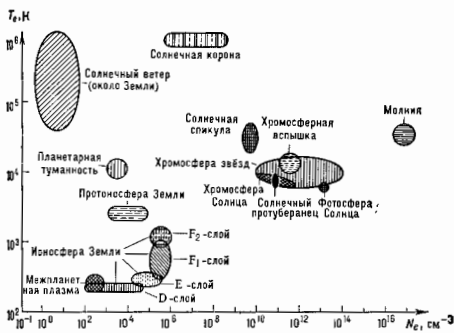


Рис. 1. Низкотемпературная плазма в природе.

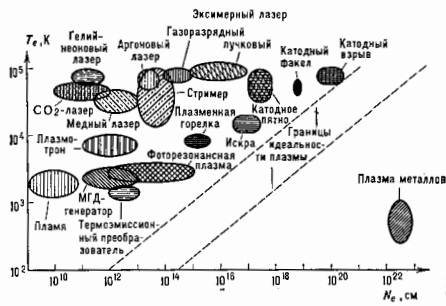


Рис. 2. Параметры лабораторной низкотемпературной плазмы.

между заряд. частицами значительно сильнее, чем взаимодействие между нейтральными частицами, и это взаимодействие дальнего действия, то наличие заряд. частиц в Н. п. в большой степени определяет её свойства, в т. ч. электрические и эл.-магнитные. Много видов Н. п. существует в природе (рис. 1), создают Н. п. и в разл. спец. лабораторных системах (рис. 2). Н. п. в соответствии с физ. свойствами может быть стационарной, нестационарной, равновесной, неравновесной, идеальной, неидеальной.

Стационарная и нестационарная Н. п. Стационарная Н. п. обладает большим временем жизни по сравнению с временами релаксации в ней. Нестационарная (импульсная) Н. п. имеет жесткое огранич. время, определяемое как временем установления равновесия в плазме, так и внеш. условиями. Плазма, время жизни к-рой превышает характерное время переходных процессов, наз.

квазистационарной. Напр., плазма в канале молнии образуется и поддерживается в результате прохождения через него электрич. тока. Характерное время установления равновесия в проводящем канале  $\sim 10^{-8}$  с, характерное время расширения (т. е. разрушения) этого проводящего канала  $\sim 10^{-8}$  с, поэтому в течение прохождения осн. части тока через проводящий канал плазма в нём можно считать квазистационарной.

Равновесная и неравновесная Н. п. Низкотемпературная плазма наз. равновесной, если её компоненты находятся в термодинамич. равновесии, т. е. темп-ра электронов, ионов и нейтральных частиц совпадает. В Н. п. легко создаются неравновесные условия в результате селективного действия внеш. электрич. полей: электрич. энергия от них передается заряд. частицам, а те отдают её частицам газа при столкновениях. При таком способе введения энергии ср. энергия заряд. частиц может значительно отличаться от тепловой энергии нейтральных частиц. В первую очередь это относится к электронам, к-рые из-за малой массы неэффективно обмениваются энергией при упругом столкновении с нейтральными частицами газа. При этом не только ср. энергия электронов, но и вид распределения электронов по энергиям может существенно отличаться от равновесного.

Равновесная плазма обычно реализуется в газе при высоком давлении, где столкновения частиц происхо-

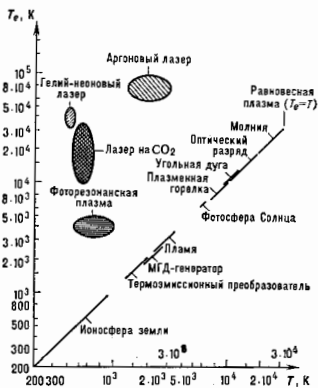


Рис. 3. Параметры равновесной и неравновесной низкотемпературной плазмы;  $T_e$  — температура газа;  $T_i$  — температура электронов.

дят часто и скорость установления равновесия относительно велика. Примерами такой плазмы являются плазма дугового разряда при атм. давлении, плазма искрового разряда или молнии в атмосфере.

Характерным примером неравновесной плазмы является плазма *теплого разряда* или плазма *дугового разряда* низкого давления; напр., в плазме гелий-неопового лазера при давлении газа  $\sim 10$  тор темп-ра газа в центре разрядной трубки  $\approx 400$  К, тогда как ср. энергия электронов виск. эВ (рис. 3).

Идеальная и неидеальная плазма. Плазма считается идеальной, если ср. кинетич. энергия заряд. частиц  $(3/2)kT$  много больше ср. энергии её взаимодействия с окружающими частицами:

$$\frac{3}{2} kT \gg e^2 \frac{v_d}{r_D},$$

где  $e$  — заряд электрона,  $T$  — темп-ра,  $r_D$  — дебаев-

ский радиус экранирования. Идеальной плазме можно определить также как плазму, в  $k$ -рой часть заряд. частиц в сфере с дебаевским радиусом велико. Оба определения приводят к одинаковому соотношению для параметров идеальной плазмы:

$$N e^3 T^3 \ll \epsilon.$$

Числовой коэф.  $\epsilon$  в этом соотношении равен  $9/32\pi$ , если пользоваться первым условием, и  $1/96$  для второго условия. Такое различие делает границу между идеальной и неидеальной плазмой весьма размытой, а это означает, что в промежуточной области параметров неидеальность плазмы может существенно влиять на одни её свойства и не сказываться на других.

Неидеальная плазма с чисто кулоновским взаимодействием между частицами (полностью ионизованная) реально не существует. В такой плазме с большой скоростью происходит рекомбинация ионов и электронов с характерными временами значительно меньше атомных. За такие времена плотность заряд. частиц существенно падает, а их темп-ра повышается и плазма перестаёт быть идеальной. Неидеальная плазма существует в многокомпонентной системе, где возникает доп. условия стабилизации плазмы. Типичным примером неидеальной плазмы является плазма металла,  $k$ -рая сохраняется идеальной за счёт сил взаимодействия с участием ионов решётки металла. Т. о., неидеальная плазма существует при плотности частиц, сравнимой с плотностью конденсированного состояния вещества. Слабоионизованный газ всегда является идеальной плазмой.

Н. п. можно также разделять на типы по способам её получения или использования: газоразрядная, пучковая, фоторезонансная, лазерная, ионосферная, солнечная, космич. плазма.

## 2. Способы создания Н. п.

В Н. п. потери заряд. частиц связаны с рекомбинацией электронов и ионов и с уходом заряд. частиц на стенки сосуда или за пределы занимаемого объёма. Для поддержания существования плазмы необходимы процессы ионизации,  $k$ -рые создают новые заряд. частицы.

Наиб. старый и простой способ создания Н. п. — газоразрядный. Плазма создаётся в результате протекания в газе электрич. тока между электродами,  $k$   $k$ -рым приложена постоянно поддерживаемая разность потенциалов. Газовый разряд содержит ряд областей, различающихся по своим свойствам, и поэтому имеется неск. типов газовых разрядов (см. *Электрические разряды в газах*). Для газоразрядной плазмы характерна квазиустойчивость, т. е. время её существования значительно превышает характерное время жизни отдельно выделенной заряд. частицы.

Газоразрядному способу создания Н. п. подобно создание плазмы при электрич. пробое газа,  $k$ -рый осуществляется под действием разности потенциалов, приложенной к электродам. В этом случае получают импульсную плазму,  $k$ -рая распадается, как только электроды разрядятся. Пробой газа имеет неск. стадий, в итоге  $k$ -рых образуется проводящий канал — искровой разряд. Подобное явление имеет место в приземной атмосфере: молния — пробой газа между облаками или между облаком и землёй во время грозы.

Пробой газа может произойти за счёт высокой напряжённости эл.-магн. волн при прохождении сфокусиров. лазерного излучения через газ — лазерный пробой (см. *Оптические разряды*). Н. п., образовавшаяся при газовом пробое, распадается в результате рекомбинации и диффузии заряд. частиц. Такую плазму наз.  $r$  а с и а д а ю щ е й с я п л а з м о й или плазмой в послесвечении и используют для измерения скоростей рекомбинации и коэф. диффузии заряд. частиц.

Под действием резонансного излучения образуется т. н. *фоторезонансная плазма*. Энергия фотонов резонансного излучения совпадает с энергией возбуждения

атомов или молекул газа. Образуются при поглощении резонансных фотонов возбуждённые атомы или молекулы при дальнейших столкновениях ионизируются. В качестве источника резонансного излучения используется разрядная лампа, содержащая данный газ, или преобразуемый лазер. Этот способ генерации плазмы особенно легко регулировать её параметры, поэтому фоторезонансная плазма применяется при создании пламенных нелинейных оптич. элементов для преобразования и стабилизации частоты лазерного излучения, для создания источников ионов разного сорта, акустич. источников и т. д. Фоторезонансная плазма отличается от газоразрядной плазмы по своим параметрам. В газоразрядную плазму энергия вводится через эл. электроны, а от них она передаётся плазме, в фоторезонансной плазме энергия первоначально вкладывается в возбуждение атомов. Поэтому средняя энергия электронов в фоторезонансной плазме существенно ниже, чем в газоразрядной.

При прохождении электронного пучка через газ возникает пучок в а п л а з м а. Обычно для её создания используются пучки электронов с энергией в неск. сотен кэВ. Такие электроны свободно проходят через тонкие фольги и поэтому могут транспортироваться из электронной пушки в лаб. установку, содержащую газ при более высоких давлениях. Осн. процесс взаимодействия быстрых электронов с атомами или молекулами газа — ионизация атомов или ионов. Образуются при этом вторичные электроны имеют энергию, в неск. раз превышающую потенциал ионизации атомов или молекул. Т. о., при прохождении пучка электронов через газ энергия быстрых электронов преобразуется в энергию вторичных электронов ( $k$ -рая далее и используется) с высоким коэф. преобразования. Поэтому вид устройств, возбуждаемых электронным пучком, достаточно велик. Напр., вид молекулярных, хим. и аксиерных лазеров, возбуждаемых электронным пучком,  $> 10\%$ . Однако осн. достоинство возбуждения плазмы электронным пучком — возможность быстрого повода энергии. Характерные времена возбуждения плазмы электронным пучком  $\sim 10^{-8}$  с. Благодаря этому электронный пучок используется не только для создания импульсной Н. п., но и для предионизации. В мощных лаб. устройствах электронный пучок создаёт однородную первичную плазму,  $k$ -рая далее развивается под действием электрич. импульсного разряда.

В 1980-е гг. широкое развитие приобретает *лазерная плазма*. Лазер используется для разл. технол. операций — обработки поверхностей, сварки, резки металлов и т. д. При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью образуется лазерная плазма,  $k$ -рая, взаимодействуя с лазерным излучением, может поглощать его, препятствуя проникновению лазерного излучения к обрабатываемой поверхности. Лазерная плазма — спещифич. физ. объект, требующий исследования в лаб. условиях конкретных технол. процессов.

Имеется много др. способов генерации Н. п. Плазма может быть получена под действием жесткого излучения, ионизирующего газа (ионосфера Земли и др. планет), в результате прохождения пучка ионов или нейтронов через газ. В качестве генератора Н. п. могут быть использованы радиоакт. источники.

Ещё один способ создания Н. п. — химический: в пламенных заряд. частицы образуются в результате процессов хемиионизации.

## 3. Процессы в Н. п.

Осн. процессами в Н. п. являются элементарные процессы возбуждения и ионизации газа, рекомбинации заряд. частиц и др., процессы переноса заряд. и возбуждённых частиц, а также процессы переноса энергии за счёт теплопроводности, конвекции. Число типов элементарных процессов в Н. п. достигает неск. десятков. На примере плазм воздуха (табл.) рассмотрим характер элементарных процессов в Н. п.

Первостепенное значение среди элементарных процессов в Н. п. имеют процессы ионизации, ибо они поддерживают плазму. Чаще ионизация происходит в результате столкновения с электронами. Процесс 4 наз. прямой ионизацией, процесс 2 — ступенчатой ионизацией, представляющей собой последовательность процессов возбуждения метастабильного состояния (13) и ионизации возбуждённой молекулы. Ступенчатая ионизация эффективно происходит в относительно плотной плазме. Заряд. частицы в Н. п. могут образовываться с участием возбуждённых частиц — ассоциативная ионизация (3) или *Пеннинга эффект*. Заряд. частицы возникают также в результате фотоионизации. Процесс 4 — осн. процесс образования ионосферной плазмы под действием КВ-излучения Солнца.

Рекомбинация и заряд. частиц в плазме может идти по разным каналам. Процессы 5, 6 — диссоциативная рекомбинация электрона и молекулярного иона, процесс 7 — взаимная нейтрализация положит. и отрицат. ионов, процесс 8 — трёхчастичная рекомбинация электрона и иона, процесс 9 — фторорекомбинация. Каждый из этих процессов при соответствующих условиях может быть доминирующим.

Элементарные процессы в низкотемпературной плазме

Тип процесса	№ процесса	Схема типичного процесса
Ионизация	1	$e + N_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow 2e + N_2^+$
	2	$e + N_2(A^2\Sigma_u^+) \rightarrow 2e + N_2^+$
	3	$2N_2(A^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_4^+ + e$
	4	$O + \Lambda e \rightarrow O^+ + e$
Реномбинация	5	$e + N_2^+ \rightarrow N + N$
	6	$e + N_4^+ \rightarrow N_2 + N_2$
	7	$N_2^+ + O^- \rightarrow N_2 + O_2$
	8	$e + O^+ + N_2 \rightarrow O + N_2$
	9	$e + O^+ \rightarrow O + \Lambda e$
Прилипание	10	$e + O_2 + N_2(O_2) \rightarrow O_2^- + N_2(O_2)$
	11	$e + O_2 \rightarrow O^- + O$
	12	$e + O \rightarrow O^- + \Lambda e$
Возбуждение	13	$e + N_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow e + N_2(A^2\Sigma_u^+)$
	14	$e + N_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow e + N_2(C^2\Pi_u)$
	15	$e + N_2(v=0) \rightarrow e + N_2(v \neq 0)$
Перезарядка	16	$N_2 + O_2^- \rightarrow N_2^+ + O_2$
	17	$N_2^+ + N_2 \rightarrow N_2 + N_2^+$

Важную роль, особенно в плазме электроотрицательных газов, играют процессы прилипания электрона к атому или молекуле, в результате чего образуется отрицат. ион. Хотя процессы прилипания электрона не изменяют число заряд. частиц в плазме, но при таком переходе резко падает проводимость плазмы, существенно изменяются её др. свойства. Процесс 10 — диссоциативное прилипание электрона к молекуле, процесс 12 — фотоприлипание. В частности, в атм. воздухе в результате процесса 10 за  $10^{-7}$  с первоначально образованные медленные электроны превращаются в отрицат. ионы, а процесс 12 ответствен за ночное свечение неба.

Процессы возбуждения атомов и молекул существенны и для поддержания Н. п. и при преобразовании энергии внеш. источника в энергию излучения в газоразрядных лампах и газовых лазерах. Процесс 13 — образование метастабильной молекулы — является первой стадией ступенчатой ионизации молекулы.

Процесс 14 — возбуждение резонансных состояний молекул; в азотном лазере, напр., этот процесс создаёт инверсную заселённость уровней. Процесс 15 — возбуждение колебат. уровней молекулы, этот процесс преобладает в тлеющем разряде в атоме и в лазере на углекислом газе, что обеспечивает большой кпд и высокую мощность лазера.

Процессы перезарядки и 16, 17 приводят к переходу заряда от одной частицы к другой. Особенно существенна резонансная перезарядка (17), к-рая эффективна угристого рассеяния, т. е. резонансная перезарядка происходит при противоположных траекториях движения иона и молекулы. Резонансная перезарядка определяет параметры транспорта ионов — подвижность и коэф. диффузии (продольной и поперечной по полю) в собств. газе.

Рассмотренные процессы типичны для разл. видов плазмы, но для каждой конкретной системы могут оказаться важными, определяющими свойства и параметры плазмы, и др. типы процессов. Напр., это могут быть процессы колебательной *релаксации* возбуждённых молекул, процессы тушения возбуждённых молекул и атомов при столкновении с электронами и нейтральными частицами, процессы разрушения отрицат. ионов и т. д.

#### 4. Неустойчивости в структуре Н. п.

Коллективные явления не играют в Н. п. первостепенной роли, как в горячей плазме, но их влияние на свойства плазмы может быть заметным. Присутствие большого числа нейтральных частиц в слабоионизов. плазме приводит к затуханию мн. типов колебаний, характерных для горячей плазмы, и к устойчивости Н. п. относительно этих колебаний. Если степень ионизации плазмы не очень мала, то осн. типы колебаний плазмы возникают в ней, хотя и не так чётко выражены. В частности, в положит. столбе дугового разряда низкого давления, где степень ионизации плазмы доходит до процентов, присутствуют как плазменные колебания, так и ионный звук. Возникновение плазменных неустойчивостей приводит, в свою очередь, к осцилляциям разрядного тока.

Неустойчивости Н. п., приводящие к нарушению пространственного распределения плазмы или к её разрушению, существенно отличаются от неустойчивостей горячей плазмы. Осн. типы неустойчивостей Н. п.: ионизационная, прилипательная и тепловые неустойчивости.

Ионизационная неустойчивость обусловлена связью скорости ионизации с пространств. распределением заряж. частиц, со ср. энергией электронов или с др. параметрами плазмы. В случае ионизат. неустойчивости снижение скорости ионизации уменьшает соответствующий параметр плазмы, а это приводит к последующему понижению скорости ионизации. Механизм равнания ионизат. неустойчивости может быть много в зависимости от конкретных условий.

Прилипательная неустойчивость связана с процессом перехода отрицат. заряда от электронов к отрицат. ионам. В этом случае образование отрицат. иона изменяет параметры плазмы так, что делает благоприятным дальнейшее прилипание электронов к атомам. В результате либо нарушается однородное распределение плазмы, либо нарушаются условия существования плазмы и она разрушается (подробнее см. *Плазма электроотрицательных газов*).

Тепловые неустойчивости проявляются во влиянии теплового режима и процессов переноса на параметры плазмы. Ярким примером является тепловой взрыв в лазере на угарном газе. Как во всяком молекулярном газе, колебат. темп-ра в плазме этого лазера превышает поступат. темп-ру газа. В процессе колебат. релаксации, связанной с тушением колебательно возбуждённых молекул, часть колебат. энергии переходит в поступательную, что приводит к повышению

темп-ры газа и увеличению теплового потока на стенку за счёт теплопроводности. С ростом темп-ры газа резко возрастает скорость колебат. релаксации. Тепловой поток в газе не в состоянии унести энергию, выделяемую при колебат. релаксации. Оставаясь в газе, она приводит к увеличению его поступат. темп-ры, а это, в свою очередь, к повышению скорости колебат. релаксации. Возникает тепловая неустойчивость, в результате к-рой колебат. энергия быстро перерабатывается в поступающую до тех пор, пока колебат. и поступат. темп-ры газа не сравняются. Эта неустойчивость ограничивает уд. мощность лазера на угарном газе.

Неустойчивости Н. п. нарушают однородное распределение плазмы в пространстве и могут привести к появлению новых структур. Одной из них, наиб. изученной, является сжатие, или *контракция газового разряда*. В длинной цилиндрич. трубке свечение газового разряда и электрич. ток сжимаются к оси, и в остальной части трубки газ не возбуждается. Механизм контракции разряда может быть разным, но суть её состоит в следующем. Из-за резкой зависимости скорости ионизации от плотности газа и повышения темп-ры вблизи оси трубки (где проходит ток) ионизация газа происходит только вблизи оси трубки. За счёт разных механизмов рекомбинации заряд. частицы гибнут в объёме не доходя до стенок трубки. В результате заряженные частицы сосредоточены вблизи оси трубки, в этой области происходит возбуждение газа и наблюдается его свечение.

Др. тип структур в газоразрядной плазме — *страты* — чередующиеся светящиеся и тёмные области разряда; эта правильная полосатая структура может перемещаться и обжечь к электроду, а может быть неподвижной. Страты существуют в определ. области токов и давлений; механизмы их возбуждения и характер проявления различны для атомных и молекулярных газов. Страты возникают при таких параметрах разряда, при к-рых существует ступенчатая ионизация газа, так что скорость ионизации зависит от плотности электронов нелинейно. Возникновение страт обусловлено тем, что с увеличением плотности электронов повышаются скорость ионизации и ср. энергия (темп-ра) электронов, а это в свою очередь вызывает возрастание плотности электронов. Страты как осциллирующая структура распределения электронов в разряде выгоднее однородного распределения, ибо при таком распределении более эффективно используется вводимая в газ энергия. Амплитуда осцилляции плотности электронов и размер страт определяются механизмом возникновения неустойчивости и конкретными параметрами плазмы.

В газоразрядной плазме распространён ещё один тип структуры — до м е н. Первоначально такие структуры наблюдались и исследовались в полупроводниковой плазме и известны как *Гованна эффект*. Электрич. домены в газоразрядной плазме — движущиеся в пространстве возмущения плотности электронов, представляющие собой резкое и узкое повышение плотности электронов, а за ним движется широкий и слабый «хвост». Это возмущение может перемещаться или вместе с током, или в обратном направлении. При этом интегрированное по времени изменение плотности электронов равно нулю. Домены могут возникнуть, если имеется немонотонная зависимость тока от напряжённости электрич. поля, напр. в случае немонотонной зависимости дрейфовой скорости электронов от напряжённости электрич. поля или если отношение плотности отрицат. ионов в плазме к плотности электронов растёт с увеличением напряжённости электрич. поля. Повышение напряжённости поля и рост ср. энергии электронов усиливают диссоциативное приращение электронов к молекулам и зависимость тока от напряжённости электрич. поля при одном и том же токе и создают электрич. домен.

## 5. Применение Н. п.

Разнообразное использование Н. п. определяется простотой её создания. Газоразрядная плазма применяется в газовых лазерах и источниках связи, в плазменных процессах и процессах очистки газов, для обработки поверхностей, в разл. техкол. и металлургич. процессах. Н. п. как рабочее тело используется при преобразовании тепловой энергии в электрическую, в *магнетогидродинамических генераторах* и термомеханистном преобразователе. В *плазмотроне* Н. п. выполняет роль теплоносителя. Вводимая а плазму электрич. энергия передаётся электронам, а от них — атомам или (и) молекулам газа и нагревает его. Уд. энергия, вводимая в такой газ, заметно выше энергии в плазме газовой горелки.

Применения Н. п. можно разделить на две стадии. В первой из них плазма является рабочим телом конкретных установок и приборов (газоразрядные лазеры и лазеры, возбуждаемые электронным пучком, МГД-генератор, термомеханистный преобразователь, газоразрядные источники света и т. д.); во второй — плазма составляет основу соответствующих технологий.

Техкол. применения плазмы обеспечиваются двумя её качествами. Во-первых, в плазме могут быть достигнуты гораздо более высокие темп-ры, чем в горелках на хим. топливе, поэтому плазма является отличным теплоносителем; во-вторых, в плазме образуется много ионов, радикалов и разл. химических активных частиц, поэтому в плазме или с её помощью можно провести хим. процессы в объёме или на поверхности, имеющие практич. значение.

Применение плазмы как теплоносителя связано с процессами сварки и резки металлов. Поскольку макс. темп-ра в хим. горелках  $\approx 3000$  К, они не подходят для этой цели. Дуговой разряд позволяет создать плазму с темп-рой в 3—4 раза выше, к-рая при соприкосновении с металлом расплавляет его. Плазменные методы сварки и резки металлов обеспечивают более высокую уд. производительность, качество продукта, дают меньше отходов, но требуют больших затрат энергии и более дорогого оборудования.

Плазма как теплоноситель используется в топливной энергетике. Введение плазмы в зону сжигания низкокалорийных углей существенно улучшает энергетич. параметры процесса.

Как хороший теплоноситель плазма позволяет производить термич. обработку поверхности и её закалку. При этом не изменяется хим. состав поверхности, но улучшаются её физ. параметры. При др. способе обработки поверхности активные частицы плазмы вступают в хим. реакцию с материалом поверхности. Напр., при проионировании ионов или активных атомов из плазмы в приповерхностный слой в нём образуются нитриды или карбиды металлов, что упрочняет поверхность. Плазма может не вступать в хим. реакцию с поверхностью, но образует на ней свои хим. соединения в виде плёнок, обладающих нек-рым набором механич., тепловых, электрич., оптич. и хим. свойств в зависимости от параметров плазмы. Толщина плёнки, напыляемой на поверхность из плазмы, пропорц. времени плазменного процесса. Изменяя через нек-рое время состав плазмы, можно создавать многослойную структуру. Обработка отл. слоев сфокусиров. излучением ртутной лампы или лазера позволяет создавать профилир. плёнки с мин. размером отл. элементов в неск. микрон (см. *Плазменная технология*).

Н. п. применяется для получения ряда хим. соединений, полимеров и полимерных мембран, а также при произ-ве порошков керамики, соединений (SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), металлов и окислов металлов (см. *Плазмохимия*).

Н. п. используется для анализа элементного состава вещества, осуществляемого двумя способами. В первом из них исследуемое вещество вводится в плазменную горелку — дуговой разряд с проточной плазмой — в

микроколичествах либо в виде порошка, либо в виде капель. В плазме вещество диссоциирует на атомы, к-рые частично возбуждаются и излучают. По спектральному составу излучения определяется элементный состав вещества. Этот метод, наз.  $\alpha$  м и с к о п и м с п е к т р а л ь н ы м а н а л и з о м

и имеет долгую историю и применяется для анализа металлов и сплавов; он позволяет надежно определять содержание примесей в кол-ве, превышающем  $10^{-3}$ – $10^{-4}\%$ . В др. способе элементного анализа исследуемое вещество также вводится в пламя или в проточную плазму газового разряда, к-рые находятся между двумя электродами. Пламя или плазма облучаются излучением перестраиваемого лазера, и протекающий через плазму ток измеряется как функция длины волны излучения. Как только излучение попадает в резонанс с переходами атомов, находящихся в плазме, то изменяются условия ионизации атомов и, следовательно, разрядный ток. Этот эффект наз.  $\alpha$  п т о г а л ь в а н и ч е с к и м

чувствительность методов, использующих этот эффект, на неск. порядков выше, чем в эмиссионном спектральном анализе.

### 6. Н. п. земной атмосферы и Солнца

Н. п. присутствует в окружающей нас природе. На небольших высотах плазма может возникать под действием электрич. полей, существующих в атмосфере. В результате конвективных течений в атмосфере происходит разделение заряда и возникает электрич. поле со ср. напряженностью у поверхности Земли  $\sim 100$  В/м, а также электрич. токи.

Одно из проявлений разделения заряда в атмосфере связано с возникновением молний. В момент прохождения осн. тока молнии её канал представляет типичную Н. п., напоминающую плазму дуги высокого давления и плазмотроны. Темп-ра плазмы в канале молнии достигает 30 000 К, плотность заряд. частиц  $\sim 10^{17}$  см $^{-3}$  при диаметре канала порядка 1 мм.

Ионизов. газ верх. атмосферы — *ионосфера* возникает в осн. под действием излучения Солнца. Ионосферу принято делить на ряд слоев ( $D, E, F_1, F_2$ ), расположенных на высотах 50–90, 90–140, 140–200 и 200–400 км.

Ср. концентрация заряд. частиц в слое  $D$  составляет  $\sim 10^9$  см $^{-3}$ . Отрицат. заряд в этом слое создается в осн. разл. отрицат. ионами; наиб. распространённым положит. ионом является кластерный ион  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .

Заряд. частицы в слое  $E$  образуются в результате фотсионизации газа под действием УФ-излучения. Эти заряд. частицы дрейфуют в нижние слои атмосферы и служат источником плазмы в  $D$ -слое ионосферы. Плотность электронов в  $E$ -слое  $\sim 10^6$  см $^{-3}$ , отрицат. ионы в этом слое практически отсутствуют; типич. положит. ионы —  $\text{O}_2^+$  и  $\text{O}^+$ . Гибель заряд. частиц в слое  $E$  обусловлена диссоциативной рекомбинацией электронов и ионов и уходом частиц в нижние слои.

Плотность электронов в слоях  $F_1$  и  $F_2$   $\sim 10^8$ – $10^8$  см $^{-3}$ , осн. тип положит. ионов  $\text{O}^+$ . Заряд. частицы в слоях  $F$  образуются в результате ионизации атомарного кислорода под действием УФ-излучения Солнца. Гибель заряд. частиц определяется фоторекомбинацией электронов с ионом кислорода, фотоэриллинием электрона к атому кислорода, а также уходом заряд. частиц в нижние слои.

Слой  $E$  и  $F$  ионосферы отражают радиоволны, обеспечивая связь на КВ и ср. волнах на большие расстояния. Поскольку плазма этих слоев создается под действием излучения Солнца, параметры плазмы могут существенно меняться на протяжении суток и времени года, что влияет на распространение радиоволн. На высотах  $E$  и  $F$  слоев работают также ИСЗ. На этих высотах чаще всего развивается *полярное сияние*, возникающее при ионизировании потока солнечных протонов в атмосфере.

Околосолнечная плазма на больших высотах, а также межпланетная плазма создаются *солнечным ветром*, и структура магнитосферы определяется взаимодействием солнечного ветра с магн. полем Земли. Электроны, захваченные магн. полем Земли, образуют *радиационные пояса* Земли.

Параметры солнечной плазмы, как и атмосферной, резко различаются в зависимости от области Солнца. Во внутр. части Солнца темп-ра достаточно высока, так что там находится сильноионизованная плазма. На поверхности Солнца и в окрестности Солнца степень ионизации плазмы невысока, т.е. здесь содержится Н. п. Поверхностный слой Солнца толще  $\sim 1000$  км, из к-рого испускается осн. часть эл.-магн. излучения Солнца, наз. *фотосферой*. Плотность атомарного водорода в фотосфере  $\sim 10^{17}$  см $^{-3}$ , плотность заряд. частиц  $\sim 10^{14}$  см $^{-3}$ , темп-ра равновесной плазмы  $\sim 6000$  К. Это излучение определяется в осн. процессом фотоэриллипания электрона к атому водорода. Образующие при этом отрицат. атомы водорода далее быстро разрушаются при столкновениях, так что отрицат. заряд фотосферной плазмы образуется в осн. электронами.

Разреженная область плазмы над поверхностью Солнца — *солнечная корона*. Плотность плазмы в короне резко падает по мере удаления от Солнца. Особенности солнечной короны являются её высокая темп-ра ( $\sim 10^6$  К). Поэтому солнечная корона испускает жесткое (рентгеновское) излучение. Кроме того, она является источником солнечного ветра.

Лит.: Пикельнер С. В., Основы космической электродинамики, 2 изд., М., 1966; А н а с о ф о в С. И., Ч е л м е н о в С., Солнечная физика, пер. с англ., ч. 1–2, М., 1974–75; С м и р и о в В. М., Введение в физику плазмы, 2 изд., М., 1982; А р ц и м о в и ч Л. А., С а г д е е в Р. З., Физика плазмы для физиков, М., 1979; В и б е р г м а н Л. М., В о р о б о в В. С., Я к у б о в И. Т., Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы, М., 1982; Р а й з е р Ю. П., Физика газового разряда, М., 1987. Б. М. Смирнов.

**НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕОРЕМЫ** в квантовой теории поля — устанавливают соотношения для амплитуд разл. процессов в пределе нулевого или малого 4-импульса частицы, источником к-рой является сохраняющийся или частично сохраняющийся ток. Такими частицами являются, напр., фотон, к-рый взаимодействует с сохраняющимся *электромагнитным током*,  $\pi$ -мезон, связанный с частично сохраняющимся *аксиальным током* (см. также *Аксиальный ток*), *гравитон*, взаимодействующий с сохраняющимся тензором энергии-импульса. Н. т. являются следствием симметрии лагранжиана теории, причём преобразования симметрии величин, т.е. меняют число частиц. Нищее по энергии состояние (вакуум) при этом бесконечно вырождено.

Наиб. известные примеры таких симметрий — симметрии относительно *калибровочных преобразований* в квантовой электродинамике и симметрии относительно киральных преобразований, отвечающих группе  $SU(2) \otimes SU(2)$ , в *квантовой хромодинамике*. В первом случае преобразование симметрии имеет вид

$$\delta A_\mu = \partial_\mu \Lambda, \quad (1)$$

где  $\delta A_\mu$  — вариация 4-потенциала фотона,  $\partial_\mu \Lambda$  — производная от произвольной ф-ции  $\Lambda$  ( $\partial_\mu \equiv \partial/\partial x_\mu$ ,  $\mu = 0, 1, 2, 3$ ). На квантовом языке преобразования (1) меняет число т. и. скалярных и продольных фотонов в вакууме.

Н. т. особенно полезны в теориях с сильной связью, напр. в электродинамике адронов или  $\pi$ -мезонной физике, где точное вычисление амплитуд невозможно.

Исторически первой Н. т. явилась теорема Лоу (F. E. Low, 1954) о том, что первая поправка по частоте фотона к амплитуде испускания мягких фотонов может быть найдена модельно-независимым образом заменой  $p_\mu \rightarrow p_\mu - eA_\mu$  ( $e$  — электрич. заряд частицы,  $p_\mu$  —  $e$  4-импульс) в амплитуде *нерадич.* процесса (без испускания мягкого фотона). В частности, в случае рас-



своя заряд. Частицы на нейтральной с испусканием фотона малой частоты  $\omega$ , согласно теореме Лоу, амплитуда радиан. процесса  $\mathcal{M}_r$  (в членах  $\sim \omega^{-1}$  и  $\omega^0$ ) полностью определяется амплитудой радиан. процесса  $\mathcal{M}_{\text{упр}}$  (к-рая считается известной) и равна

$$\mathcal{M}_r = e\sqrt{4\pi} \left\{ \left[ \frac{p'_1 e}{p'_1 k} \right] - \left[ \frac{p_2 e}{p_1 k} \right] \right\} \mathcal{M}_{\text{упр}} + \left[ (e p_1) \frac{(p_2 k)}{(p_1 k)} - (p_2 e) + \left( p'_1 e \frac{(p_2 k)}{(p_1 k)} - (p'_2 e) \right) \right] \frac{\partial \mathcal{M}_{\text{упр}}}{\partial a}, \quad (2)$$

где  $p_1$ ,  $p'_1$  и  $p_2$ ,  $p'_2$  — соответственно 4-импульсы заряд. и нейтральных частиц до и после столкновения,  $k_\mu$ ,  $e_\mu$  — 4-импульс и поляризация фотона, круглые скобки означают скалярное произведение, напр.,  $(p'_1 e) \equiv \equiv (p'_1 e_\mu)$  (по повторяющемуся индексу  $\mu$  предполагается суммирование),  $s$  — инвариантная переменная:

$$s = (p_1 + p_2)^2 = (p'_1 + p'_2)^2.$$

Поправки к соотношению (2), к-рые уже зависят от механизма радиан. процесса, составляют величину первого порядка по  $k'_\mu$ .

Для л-мезонов наиб. известной Н. т. являются теорема Айлера (S. Adler, 1965) о том, что амплитуда испускания л-мезона затухает в пределе нулевого 4-импульса пиона. Точнее, это утверждение относится к неполюсной части амплитуды. Полусная же часть, связанная с испусканием л-мезонов из внешних линий, должна быть учтена явно (аналог полюсных членов, т. е. первого слагаемого, в ф-ле (2)).

Позже было получено большое число Н. т. как для фотонов, так и для К-мезонов, гравитонов.

Лит.: Вайнштейн Я. А., Захаров В. И., Частичное сохранение аксиального тока и процессы с «мягкими» л-мезонами, «ФУФН», 1970, т. 100, с. 225; Ли Ф. и Ч. Е. М., Пирс В. и К. Я. П., 15, Реликтовская инвариантная теория поля, Ч. 2, М., 1971, гл. 18; Окумури Я. В., Лептон и кварки, 2 явл., М., 1990. В. И. Захаров.

**НИКЕЛЬ** (Niccolum), Ni, — хим. элемент VIII группы периодич. системы элементов ат. номер 28, ат. масса 58,69. В природе представлен 5 стабильными изотопами:  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{61}\text{Ni}$ ,  $^{62}\text{Ni}$ ,  $^{64}\text{Ni}$ . Наиб. распространены  $^{58}\text{Ni}$  (68,27%) и  $^{60}\text{Ni}$  (26,10%). Электронная конфигурация внеш. оболочек  $3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$ . Энергия последовательной ионизации атома Н. равна соответственно 7,633, 18,15 и 36,46 эВ. Металл, радиус атома Ni 0,124 нм, радиус иона  $\text{Ni}^{2+}$  0,074 нм. Значение электроотрицательности 1,8.

В свободном виде — серебристо-белый пластичный металл. Известны 3 модификации Н.:  $\alpha$ -Ni (кубич. гранецентр. решётка) и существующие при особых условиях  $\beta$ -Ni (кубич. решётка) и  $\gamma$ -Ni (гексагональная решётка). Параметр решётки  $\alpha$ -Ni 0,35236 нм. Плотность очень чистого Н. 8,91 кг/дм<sup>3</sup>, технического Н. 8,7—8,84 кг/дм<sup>3</sup>,  $t_{\text{пл}} = 1455^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{кип}} = 2730$ — $2915^\circ\text{C}$  (по разным источникам). Теплота плавления 17,5 кДж/моль, теплота испарения 370 кДж/моль. Уд. теплоёмкость 450 Дж/кг·К (293К), теплопроводность 88,5 Вт/м·К (при 273—373 К), термич. коэф. линейного расширения  $13,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (273 К), темп-ра Дебая 441—476 К, уд. электрич. сопротивление 0,0684 мкОм·М, работа выхода электронов 4,50 эВ. Ферромагнетик, точка Кюри 631 К. Козрицтивная сила 1,6 Э. Мн. сплавы Н. и не-к-рые его соединения также ферромагнитны.

Твёрдость Н. по Бринеллю (20°C): отожжённого 881 МПа, литого 600—800 МПа, ковального 1200—1500 МПа. Модуль нормальной упругости 196—210 ГПа, модуль сдвига 73 ГПа.

В соединениях проявляет степени окисления от +1 до +4 (наиб. характерна +2). Химически мало активен, в воздухе покрывается устойчивой оксидной плёнкой; устойчив к окислению при нагревании и к

воздействию щелочных растворов. Способен поглощать большие кол-ва  $\text{H}_2$  и СО.

Н. — компонент легиров. сталей и сплав. (жаростойких, сверхтвёрдых, антикоррозионных, магнитных и др.) сплавов, конструкт. материал для хим. аппаратуры, катализатор хим. процессов, материал электрол. аккумуляторов. Нанесение тонких слоёв Н. (никельирование) на поверхность стальных и др. изделий предохраняет их от коррозии. Магнитоэстр. свойства Н. используются при создании источников ультразвука. Сплав Н. с железом (пермаллой) обладает высокой магн. проницаемостью и используется в запоминающих устройствах ЭВМ, в радиотехнике, устройствах связи и т. д. С. С. Бертранос.

**НИЛЬСБОРИЙ** (Nilsbohrium),  $\text{Ns}$ , — искусственно полученный радиоактивный хим. элемент V группы периодич. системы элементов, ат. номер 105, относится к трансактиноидам. (Официальное назв. — элемент № 105, назв. «Н» не утверждено ИЮПАК.) Получен (1987) шесть изотопов:  $^{286}\text{Ns}$ ,  $^{287}\text{Ns}$ ,  $^{288}\text{Ns}$ ,  $^{289}\text{Ns}$ ,  $^{290}\text{Ns}$ ,  $^{291}\text{Ns}$ . Предполагаемая электронная конфигурация внеш. оболочек  $6s^2 2p^6 3d^7 5f^5$ . По хим. свойствам близок к Та, стенью окисления +5.

Первый нуклид  $^{281}\text{Ns}$  ( $\alpha$ -распад, спонтанное деление,  $T_{1/2} = 1,8$  с) синтезирован в 1970 Г. Н. Флёреном с сотрудниками при бомбардировке мишеней  $^{243}\text{Am}$  ядрами  $^{22}\text{Ne}$ ; предложенное им назв. элемента Н. (в честь Нильса Бора, N. Bohr) принято в СССР. Почти одновременно (неск. позднее) группа амер. учёных под руководством А. Гиорсо (A. Ghiorso) получила нуклид  $^{289}\text{Ns}$  ( $\alpha$ -радиоактивный,  $T_{1/2} = 1,52$  с) и предложила назвать 105-й элемент ганшем в честь О. Гана (O. Hahn); предложение также назв. «унилшестум» (т. е. 105-й). С. С. Бертранос.

**НИОБИЙ** (Niobium), Nb, — хим. элемент побочной подгруппы V группы периодич. системы элементов, ат. номер 41, ат. масса 92,9064. В природе представлен одним стабильным нуклидом  $^{93}\text{Nb}$ . Электронная конфигурация внеш. оболочек  $4s^2 3d^4 4f^4 5s^1$ . Энергии последовательных ионизаций равны 6,88, 13,90 и 28,4 эВ. Металлич. радиус 0,147 нм, радиус иона  $\text{Nb}^{4+}$  и  $\text{Nb}^{5+}$  соответственно, 0,077 и 0,069 нм. Значение электроотрицательности 1,6.

В свободном виде — серебристо-серый металл, решётка кубич. объёмноцентрированная, постоянная решётки  $a = 0,330021$  нм. Плотность 8,570 кг/дм<sup>3</sup>,  $t_{\text{пл}} = -2469^\circ\text{C}$  (по др. данным,  $2500^\circ\text{C}$ ),  $t_{\text{кип}}$  по разл. данным от 4760 до  $4927^\circ\text{C}$ . Теплота плавления 27,6 кДж/моль, теплота испарения 661 кДж/моль, темп-ра Дебая 223—276,2 К. Работа выхода электронов 3,99 эВ. Уд. электрич. сопротивление Н. чистой 99,9% составляет 0,15 мкОм·М (при 300 К), температурн. коэф. сопротивления  $3,95 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (273—373 К). Темп-ра перехода на сверхпроводящее состояние 9,25 К. Парамагнетик, магн. восприимчивость  $2,20 \cdot 10^{-6}$  (при 298 К). Коэф. теплового линейного расширения  $7,08 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (300 К), теплопроводность 53,2 Вт/м·К (при 373 К).

Модуль нормальной упругости при растяжении 110 ГПа (293 К), модуль сдвига 37,5 ГПа, твёрдость по Бринеллю (293 К) — отожжённого листа 735 МПа, литого 750 МПа.

В хим. соединениях проявляет степени окисления от +1 до +5 (наиб. характерна +5). При комнатной темп-ре металла Н. устойчив к воздействию воздуха и кислот (кроме плавиковой). Способен поглощать (особенно в порошкообразном состоянии)  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$ .

Н. входит в состав сплавов, являющихся жаропрочными и конструкт. материалами для реакторостроения, хим. промышленности и др. областей. Используется для легирования сталей (ферроний) и сплавов цветных металлов. Входит в состав сверхпроводящих сплавов (с оловом  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , германием  $\text{Nb}_3\text{Ge}$  и др.). Как химически стойкий материал служит для изготовления теплообменников, конденсаторов и др. В качестве ра-

диоакт. индикатора наиб. значение имеет  $\beta$ -радиоактивный  $^{95}\text{Nb}$  ( $T_{1/2} = 35,0$  сут), образующийся при  $\beta$ -распаде  $^{95}\text{Zr}$  — продукта деления в ядерных реакторах.

С. С. Бердосов.

**НИТ** (от лат. *niteo* — блему, сверкаю) (нит, нл) — прежне наименование единицы яркости — кandelлы на квадратный метр; в СИ применение этого наименования не предусмотрено.

**НИТЕВИДНЫЕ КРИСТАЛЛЫ** — микроскопич. монокристаллы с очень большим ( $\geq 10$ ) отношением длины  $l$  к диаметру  $d$  (шир  $l$  от  $\sim 10$  мкм до 10 мм, типично  $\sim 1$  мм;  $d$  от  $\sim 0,01$  мкм до 100 мкм, типично  $\sim 1$  мкм). Обычно Н. к. имеют изометричное (шестиугольное, квадратное и т. д.) сечение. Им родственны ленточные кристаллы, у к-рых одно из измерений по крайней мере на порядок меньше двух остальных (толщина от  $\sim 0,1$  мкм до  $\sim 100$  мкм, типично  $\sim 10$  мкм), в то время как два других лежат в интервале от  $\sim 10$  мкм до  $\sim 10$  мм (типично  $\sim 1$  мм).

Кроме монокристаллич. Н. к. встречаются поликристаллические и аморфные — их чаще наз. волокнами или нитями. Им родственны также др. кристаллич. тела: дендриты, сферолиты (см. *Кристаллизация*).

Сильно анизотропная форма Н. к. с одной стороны, является следствием либо специфич. механизмов и кинетики их образования (роста), либо сильной анизотропии внутр. структуры данного материала; с др. стороны, эта форма обуславливает ряд уникальных физ. свойств Н. к.

Н. к. могут расти из разных сред: из газовой (паровой) фазы, раствора, твёрдой фазы. Наиб. типичен рост Н. к. из газовой фазы. Напр., Н. к. Si растут при реакции  $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + 4\text{HCl}$ . При этом механизм их роста в длину происходит, как правило, по схеме пар — жидкость — кристалл. На вершине растущего кристалла находится капля раствора кристаллизующего вещества (в данном случае Si) в к.-л. др. веществе (напр., Au). Эта капля играет роль катализатора роста: термодинамически возможная, но кинетически заторможенная реакция протекает преим. на поверхности капли раствора, создавая в ней необходимое перенасыщение. Атомы диффундируют сквозь каплю и осаждаются на границе жидкость — кристалл, а капля отодвигается, оставаясь всё время на вершине Н. к. и почти не изменяясь в размерах. В итоге Н. к. растут лишь на тех участках подложки, на к-рых был растворитель (рис. 1). Такой механизм объясняет мн. особенности роста Н. к. (в т. ч. роль примесей, к-рые

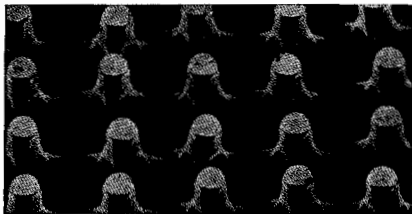


Рис. 2. Регулярная система нитевидных кристаллов Si на подложке с регулярной системой частиц металла ( $\times 1000$ ).

Механизмы роста Н. к. из др. сред менее ясны. Из растворов Н. к. лучше растут на пористых подложках, выталкиваясь от основания сквозь поры, вероятно, под действием т. н. кристаллизац. давления. В др. случаях росту Н. к. из растворов способствуют динноэпитечные (напр., органические) молекулы, к-рые, возможно, адсорбируются на боковых гранях и тормозят рост во всех направлениях, кроме одного. Сравнительно легко Н. к. растут в гелях и из электролитич. растворов.

Механизмы роста Н. к. из твёрдой фазы различны. Чаще всего их рост наблюдается на плёнках легкоплавких металлов и сплавов, нанесённых на разные подложки, и походит на экструзию под действием механич. напряжений в системе плёнка — подложка. Н. к. образуются также в процессе коррозии металлов или при электропереносе в твёрдой фазе.

Ленточные (пластинчатые), а также нолье (трубчатые) Н. к. чаще всего образуются из газовой фазы. В механизме их формирования пока много неясного. В их образовании часто большую роль играют разл. несовершенства — дислокации (особенно винтовые), дефекты упаковки, микродвойники и др. *дефекты*.

Изоженные механизмы и примеры характерны для случаев, когда данный кристалл относится к т. н. высокосимметричным сигниониям, а потому его равновесные формы изометричны. В случае низших сигнионий (триклинной, моноклинной и др.) собственная внутр. структура кристаллов такова, что их равновесная форма, как и близкие ей формы роста, анизотропна, а потому кристаллы растут, как правило, в виде Н. к., а также лент, пластинок и т. д. К этой категории относятся мн. природные кристаллы (силикаты, сульфосили и др.).

Специфич. (квазиодномерная) форма Н. к. и их малые размеры (по крайней мере, в одном измерении) делают их удобными объектами для изучения ряда физ. эффектов при кристаллизации. Так, на них легко наблюдается т. н. эффект Гиббса — Томсона (зависимость равновесного давления пара над кристаллич. частицей от её размеров), проверяются закономерности поверхностной диффузии, обнаружена радиальная периодич. неустойчивость, обусловленная, вероятно, автоколебат. явлениями в росте кристаллов (рис. 3).

Среди уникальных физ. свойств Н. к. выделяется их исключительно высокая механич. прочность, превышающая прочность массивных монокристаллов в  $10^2$ — $10^8$  раз и приближающаяся к теоретической. Здесь проявляется, в частности, раверный эффект: прочность Н. к. резко возрастает при их диам.  $\leq 5$  мкм (рис. 4). Это объясняется тем, что при таких диаметрах Н. к., как правило, не содержат дислокаций и имеют весьма совершенную поверхность. По этой же причине, благодаря меньшему рассеянию носителей заряда на дефектах и поверхности, электропроводителен Н. к. относительно мало. Особенности Н. к. состоят также в том, что Н. к. ферромагнетиков и сегнетоэлектриков, как правило, представляют собой моновомеры.

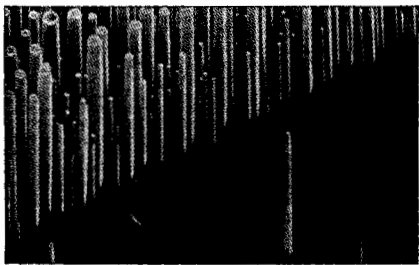


Рис. 1. Нитевидные кристаллы Si на участке монокристаллической подложки Si, предварительно покрытой частицами металла Au, инициирующими их рост ( $\times 3000$ ).

инициируют их рост) и позволяет создавать методы их управляемого выращивания (рис. 2). Существенно, что при росте по такому механизму не нужны винтовые дислокации, роль к-рых сильно преувеличивалась в ранних теориях роста Н. к.

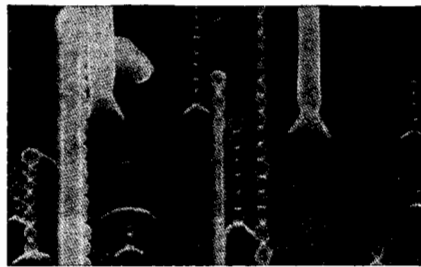


Рис. 3. Периодическая неустойчивость нитридных кристаллов Si субмикронных диаметров ( $\times 5000$ ).

На уникальных свойствах Н. к. основаны их применения. Скопирован ряд приборов (миниатюрные термометры, датодатчики и датчики Холла, дозиметрические приборы и др.), в которых Н. к. составляют наиболее чувствительную часть. В электронике Н. к. используются как высокоэффективные автономные катоды (см. *Автоэлектронная эмиссия*). Высокая механическая прочность Н. к. позволяет осуществлять на них автономный микроскоп для сравнительно легкоплавких материалов, например полупроводни-

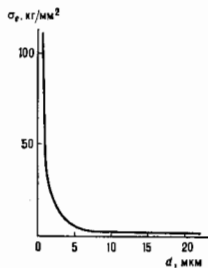


Рис. 4. Зависимость предела упругости  $\sigma_e$  у нитридных кристаллов NaCl от диаметра  $d$ .

ков. Н. к. применяются для создания высокопрочных композиционных материалов.

Лит.: Березкова Г. В., Нитридные кристаллы, М., 1969; Гиваргизов Е. И., Рост нитридных и пластинчатых кристаллов из пара, М., 1977. Е. И. Гиваргизов. НОБЕЛИИ (Nobelium), No. — искусственно полученный радиоактивный хим. элемент III группы периодической системы элементов ат. номер 102, относится к актиноидам. Официальное назв. элемент № 102, назв. «Н.» не утверждено ИЮПАК. Известны 9 изотопов Н. с массовыми числами 251—259, наиб. устойчивый  $^{259}\text{No}$  ( $T_{1/2} = 58$  мин), наиб. доступен для исследователей  $^{255}\text{No}$  ( $T_{1/2} = 3,1$  мин). Электронная конфигурация внеш. оболочек атома  $5f^{14}6d^17s^2$ . Энергия ионизации атома No 6,84 эВ. Радиус иона  $\text{No}^{2+}$  0,103 нм, иона  $\text{No}^{3+}$  0,091 нм. Возможные степени окисления в хим. соединениях +2 и +3.

О синтезе элемента № 102 впервые сообщила в 1957 международная группа учёных, работавших в Стокгольме, к-рая назвала его в честь А. Нобеля (А. Nobel), однако в дальнейшем это открытие не подтвердилось. Первые надёжные сведения о синтезе изотопов элемента № 102 с массовыми числами 252—256 получены под руководством Г. Н. Файёрова (1963—66), предложенное сов. учёными название «эколотий».

С. С. Бердосов. **НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ** — звёзды, очень быстро увеличивающие свою светимость прилб. в  $10^4$  раз по сравнению с первичной, низкой светимостью. Увеличение блеска (вспышка) происходит за неск. дней. Характерное время спада блеска после его максимума порядка 10—20 дней у быстрых новых и 2—3 мес у медленных

Н. з. Падает блеск Н. з. большей частью немонотонно — происходит т. н. вторичные вспышки с уменьшающейся амплитудой. Возвращение Н. з. к её первичной светимости занимает десятки лет.

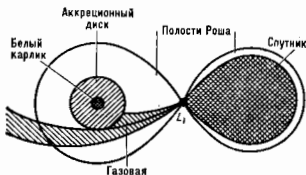
Изменения блеска Н. з. сопровождаются изменениями в спектре. При нарастании блеска в спектре доминируют абсорбц. линии, смещённые в сторону коротких волн. Их смещение обусловлено движением формирующего спектр газа к наблюдателю со скоростями порядка 1000 км/с (т. е. *Доплера эффект*). Вблизи максимума блеска спектр Н. з. становится эмиссионным, причём ширины линий прилб. соответствуют удвоенной величине смещения абсорбц. линий. Постепенно спектр усложняется, в нём появляются линии более высокого возбуждения и (через 1—3 мес) т. н. небудярный спектр, характерный для газовых туманностей. Через неск. лет вокруг вспыхившей Н. з. наблюдается оболочка (туманность), расширяющаяся прилб. со скоростью, соответствующей доплеровскому смещению абсорбц. линий при усилении блеска. Масса туманности  $\sim 10^{-4} M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  — масса Солнца). Изучение туманности постепенно ослабевает, и составленный её газ смешивается с межзвёздной средой. Т. о. данные наблюдений приводят к выводу о сырье со звёзды при вспышке её внеш. слоёв, образующих быстро расширяющуюся оболочку.

За год в Галактике фиксируется неск. вспышек Н. з. Все наблюдаемые вспышки происходят в объёме неск.  $\text{кпк}^3$  вблизи Солнца. Более далёкие Н. з. остаются незамеченными — гл. обр. вследствие *межзвёздного положения* света. Частота вспышек Н. з. в Галактике  $\sim 100$ —200 в год. Т. к. общее число вспышек за время жизни Галактики во много раз превышает полное кол-во звёзд в ней, то процесс вспышки Н. з. должен быть рекуррентным: одна и та же звезда вспыхивает много раз, интервал между последов. вспышками  $\sim 10^3$  лет или больше. Т. н. в о т о р и ч е с к и е Н. з. испытывают вспышки с амплитудой изменения блеска, на два порядка меньшей, чем у обычных Н. з., и соответствуют с меньшей массой сбрасываемой оболочке. Интервал между последов. вспышками повторных Н. з. составляет 10—30 лет. К Н. з. примыкают карликовые новые (или повторно爆发的 звёзды типа У Вл и Ц е в о в). У такой звезды блеск при вспышке увеличивается в десятки раз и остаётся таким в течение 1—10 дней, интервал между вспышками 10—100 дней. По фотометрич. и спектральным особенностям вспышки карликовых новых не похожи на вспышки Н. з. и, по-видимому, обусловлены др. механизмом.

По наблюдениям ряда вспыхивавших Н. з. установлено, что вспышки происходят в одном из компонентов тесной двойной системы (ТДС) (см. *Тесные двойные звёзды*). Такие системы содержат в качестве гл. звёзд белый карлик (БК), а спутник является звездой позднего *спектрального класса* малой светимости (красным карликом). Период обращения в тех ТДС, где происходили вспышки Н. з., составляет неск. часов, соответственно характерный размер системы порядка  $10^{11}$  см. Эти данные послужили основой для выяснения причины вспышек Н. з. и их рекуррентности. Если красный карлик заполняет свою *полюсть Роша*, то его вещество, попав в точку Лагранжа  $L_1$  (рис.), при малом возмущении скорости может попасть внутрь полости Роша БК и при надлежащих условиях присоединиться к нему. Часть вещества, теремого красным карликом, может и не быть аккрецирована БК, а будет потеряна системой и образует уплотнённую оболочку в орбитальной плоскости системы. Перекачаемое на БК вещество образует аккрец. диск (см. *Акреция*), и постепенно на его поверхности нарастает слой, содержащий большое кол-во водорода. При достаточно большой массе аккрециров. вещества плотность в нём возрастает настолько, что начинаются термоядерные реакции. Как показали расчёты, неустойчивость развивается очень быстро. В образующемся в периферийных областях БК слоевом источнике энергии достигается темп-ра  $\sim 10^8$  К и боль-

ше. При столь высоких темп-рах преобладающими являются ядерные реакции с участием C, N, O (см. *Углеродно-азотный цикл*). Развивающаяся в слое конвекция обеспечивает поступление в слоевую источник этих элементов из более веш. слоёв. Кинетика ядерных реакций в слоевом источнике зависит от светимости БК, содержания тяжёлых элементов в аккрецируемом газе и от особенностей переноса энергии в оболочке звезды. В одних условиях возникающая тепловая волна может привести к образованию ударной волны, срывающей наружные части оболочки, в других всё может ограничиться режимом повышения темп-ры в разогреваемом слое и менее бурным отделением от звезды части захваченного ею газа. Возможно, что т. н. медленные Н. з. (типичной является Новая Геркулеса 1934) возникают вторым из указанных способов.

Отрывающаяся от звезды гл. оболочка, вначале непрозрачная для излучения, по мере расширения уменьшает свою оптич. толщину т. к. к моменту максимума блеска величина  $\tau \lesssim 1$ , вследствие чего её внутр. слои становятся доступными для наблюдения. В это время спектр Н. з., вначале соответствовавший классам А или F, сильно изменяется. В оболочке при  $\tau < 1$  формируются широкие эмиссионные линии на фоне



Сечение критической аккреционной поверхности орбитальной плоскости тесной двойной системы и схематическое представление перетекания газа от спутника через точку  $L_1$ .

сравнительно слабого континуума (непрерывного спектра). Осн. долю наблюдаемого после максимума излучения Н. з. в непрерывном спектре обеспечивает протонная оболочка, образуемая горячим газом, истекающим из звезды вслед за отрывом веш. слоёв. Скорости движения этого газа в 1,5—2 раза больше, чем у гл. оболочки, а линейчатый спектр содержит линии He II, O III, N V и т. п. Движение гл. оболочки ускорится догоняющим её выброшенным газом, а сама она при этом деформируется и приобретает в ряде случаев ключеватую структуру.

Околозвездная оболочка, образованная веществом, потерянным системой до вспышки, имеет радиус  $\approx 10^3 R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$  — радиус Солнца) и массу  $\approx 10^{-4} M_{\odot}$ , сравнимую с массой гл. оболочки. При своём расширении гл. оболочка замедляет вещество околозвездной оболочки, и таким путём в ней образуется кольцеобразная структура — «экваториальный пояс». Подобные детали видны в туманностях, возникших при вспышках Н. з. (Новая Орла 1918, Новая Геркулеса 1934 и др.). Др. элементом гл. оболочки являются «полярные шапки» — конденсация газа в полярных областях, образовавшаяся, возможно, в результате взаимодействия выброшенного газа со спутником или под влиянием магн. поля БК.

У вспышек Н. з. при вспышке наблюдалось сильное ИК-излучение с планковским спектром, причём его интенсивность мало меняется в течение 2—3 мес. Т. о., в оболочках Н. з. может содержаться значит. кол-во нывыхлых частиц, происхождение к-рых пока остаётся невыясненным.

Описание механизма вспышки Н. з. позволяет понять, почему вспышки повторяются. Перетекание газа от спутника на БК до звезды происходит непрерывно с

интенсивностью  $10^7$ — $10^8 M_{\odot}/\text{год}$ , а при вспышке сбрасывается масса порядка  $10^{-4} M_{\odot}$ . Соответственно, вспышки могут происходить каждые несколько тысяч лет. У повторных новых масса оболочки на 2—3 порядка меньше, чем у обычных Н. з., и вспышки повторяются через неск. десятков лет. Причины различий между обычными Н. з. и повторными во многом не установлены.

Вспышки карликовых новых не сопровождаются сбросом оболочки. Они, по-видимому, стимулируются усилением перетекания газа на БК и проявляются в увеличении светимости аккрец. диска.

В результате вспышки Н. з. в межзвёздную среду поступают вещество и энергия. Роль поступающего от Н. з. газа в общем балансе массы межзвёздной среды не очень существенна — они дают менее 1% всего притока массы, но могут обогащать межзвёздный газ такими изотопами, как  $^7\text{Li}$ ,  $^{10}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ . Поступление энергии и Галактику от Н. з. в различных её видах может достигать  $10^{48}$  эрг/год, т. е. столько же, сколько дают сверхновые звёзды.

Лит.: Звучиновые звезды, под ред. А. А. Воржучка, Р. Е. Гершберга, М., 1970; Горбачук и В. Г. Ноголодильные и новые звезды, М., 1974; Galiaffer J. S., Sargentfield S., Theory and observations of classical nova, «Ann. Rev. Astron. and Astrophys.», 1978, v. 16, p. 171.

В. Г. Горбачук.

**НОРМАЛЬНАЯ ДИСПЕРСИЯ** — см. в ст. *Дисперсия света*.

**НОРМАЛЬНОЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ операторов** в квантовой И теории — запись произведения операторов в виде, когда все операторы рождения стоят слева от всех операторов уничтожения. Н. н. возникает в методе вторичного квантования, при этом предполагается, что любой оператор представим в виде полинома по операторам рождения и уничтожения. Отличит. свойство Н. п. — равенство нулю вакуумного среднего от любого оператора, записанного в виде Н. п. и не содержащего слагаемого, кратного единичному оператору. Н. п. было введено Дж. К. Уиком (G. C. Wick) в 1950 году того, чтобы исключить из квантовой теории поля (КТП) формальные бесконечные величины типа энергии и заряда вакуумного состояния. Понятие Н. п. оказывается основным при решении многих фундам. вопросов КТП, таких, как вывод фейнмановской диаграммной техники (см. *Фейнмана диаграммы*), установление связи между операторным формализмом и формальным функциональным интегралом, при построении аксиоматической квантовой теории поля и т. п.

Н. п. операторов  $A_1, \dots, A_n$  обозначается символом  $:A_1 \dots A_n:$ . Все свойства обычного произведения (линейность и т. д.) остаются и для Н. п., к-рое, кроме того, обладает свойством переставочности операторов под знаком Н. п., при этом операторы, подчиняющиеся Бозе — Эйнштейна статистике, оказываются переставочными, а подчиняющиеся Ферми — Дирака статистике — антипереставочными.

Все динамич. величины, зависящие от операторов с одинаковыми аргументами (лагранжева, тензор энергии-импульса, заряд и т. д.), во вторично-квантованной теории записываются в форме Н. п. Напр., оператор числа частиц для свободного скалярного поля  $\phi(x)$ , удовлетворяющего Клейна — Гордона уравнению, в терминах операторов рождения  $\phi_k^+$  и уничтожения  $\phi_k^-$  частиц с импульсом  $k$  имеет вид

$$N = \frac{1}{2} \int dk : (\phi_k^+ \phi_k^- + \phi_k^- \phi_k^+) : = \int dk \phi_k^+ \phi_k^-.$$

Для вакуумного ср. оператора  $N$  получим  $\langle N \rangle_0 = \langle 0 | N | 0 \rangle = 0$ , т. к.  $\langle \phi_k | 0 \rangle = 0$ . Если бы  $N$  не был представлен в виде Н. п., то выражение в скобках, возникающее из принципа соответствия с классич. теорией (см. *Соответствия принцип*), привело бы к  $\langle N \rangle_0$ , пропорциональному расходящемуся интегралу. Это типичный пример перестройки произведения в формализме Н. п. для операторов, подчиняющихся статис-

тике Бозе — Эйнштейна. В случае фермионов выражение в скобках имеет вид  $a_{k_1}^+ a_{k_2}^+ \dots a_{k_s}^+ a_{k_s} a_{k_{s-1}} \dots a_{k_1}$  ( $s$  — спиновая переменная), и для получения правильного оператора  $N$ , суммирующего все фермионные состояния, операторы рождения ( $a^+$ ) и уничтожения ( $a$ ) фермионов должны антикоммутировать под знаком  $N$  п. (перта над оператором означает дираковское сопряжение). Это — утверждение теоремы о связи спина и статистики (Паули теорема), вытекающей из принципа соответствия и формализма Н. п.

Для вычислений в квантовой теории поля необходимо установить связь Н. п. с обычным произведением и хронологическим произведением. Эту связь устанавливает Вика теорема. Определим спаривание двух линейных по операторам рождения и уничтожения операторов (соответственно хронологич. спаривание), обозначаемое  $\overline{A_1 A_2}$ , как вакуумное среднее от обычного произведения (хронологич. произведения). Спаривание даётся соответствующей перестановочной функцией. Для Н. п. двух линейных операторов получим

$$A_1(x)A_2(y) = \overline{A_1(x)A_2(y)} + \overline{A_1(x)A_2(y)}$$

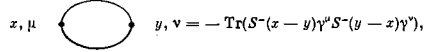
( $x, y$  — точки пространства-времени). В общем случае справедлива след. теорема Вика: обычное (хронологическое) произведение  $n$  линейных операторов равно сумме Н. п. со всеми возможными спариваниями (хронологич. спариваниями), включая и Н. п. без спариваний. Личнейность Н. п. гарантирует то, что спаривание выносятся за знак Н. п.

При разложении действия в ряд теории возмущений возникает задача представить в виде Н. п. произведение операторов (напр., лагранжиано взаимодействия), к-рые сами уже приведены к форме Н. п. Соответствующая теорема Вика утверждает, что такое произведение равно сумме всех соответствующих Н. п. со спариваниями, из числа к-рых исключены спаривания между линейными операторами, находящимися в первонач. произведении под знаком одного Н. п.

Представляя процедуру нормального упорядочения графически, получим фейнмановскую диаграммную технику, сопоставив каждому спариванию  $\overline{A(x)A(y)}$  линию, соединяющую точки  $x$  и  $y$ . Найдём, напр., в квантовой электродинамике вакуумное среднее от произведения двух операторов *электромагнитного тока*:

$$\langle 0 | \overline{\psi(x)\gamma^\mu\psi(x)} : \overline{\psi(y)\gamma^\nu\psi(y)} : | 0 \rangle = \overline{\psi(x)\gamma^\mu\psi(x)\psi(y)\gamma^\nu\psi(y)}$$

(здесь  $\overline{\psi(x)\gamma^\mu\psi(x)\psi(y)\gamma^\nu\psi(y)}$  — оператор спинорного поля,  $\gamma^\mu$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ ) — Дирака матрицы). Графически последнее выражение даётся диаграммой



где  $S(x-y)$  — перестановочная ф-ция для поля электрона.

Понятие Н. п. позволяет установить связь между операторным формализмом и формализмом функционального интеграла. Для системы с одной степенью свободы каждому вектору Фока пространства  $f(a^+)|0\rangle$  ставится в соответствие *аналитическая функция*  $f(a^*)$  числового аргумента  $a^*$  (\* — знак комплексного сопряжения). Оператор уничтожения в таком голоморфном представлении есть оператор дифференцирования по  $a^*$ , а произвольному оператору  $A$  соответствует интегральный оператор с ядром  $A(a^*, a)$ . Действие оператора  $A$  на вектор  $f$ , скалярное произведение двух векторов, произведение операторов  $A_1, A_2$  описываются соответствующими свёртками с гауссовой мерой интегрирования:

$$a\mu_a = \exp(-\alpha a^*) (2\pi i)^{-1} d\alpha^* da.$$

Для ядра произведения двух операторов имеем

$$(A_1 A_2)(a^*, a) = \int A_1(a^*, \alpha) A_2(\alpha^*, a) d\mu_\alpha.$$

Поставим в соответствие оператору  $A$ , заданному в виде Н. п.:  $A = \sum_{n,m} K_{n,m}(a^*)^n (a^*)^m$ , функцию  $K(a^*, a) = \sum_{n,m} K_{n,m}(a^*)^n a^m$ . Тогда ядро оператора  $A$  связано с  $K(a^*, a)$  соотношением

$$A(a^*, a) = \exp(a^* a) K(a^*, a).$$

Рассмотрим оператор эволюции  $U(\Delta t) = \exp(-iH\Delta t)$ , где  $H = :H(a^*, a):$ . Его ядро для малых  $\Delta t$

$$U(\Delta t; a^*, a) = \exp\{a^* a - ih(a^*, a)\Delta t\};$$

для конечного интервала  $t' - t'' = N\Delta t$  следует взять свёртку  $N$  таких ядер. При этом из первого члена и меры интегрирования возникнет сумма

$$\sum_{i=1}^{N-1} (a_{i+1}^* - a_i^*) a_i + a_1^* a_0,$$

и после симметризации по  $a^* = a_N$  и  $a = a_0$  в формальном пределе  $\Delta t \rightarrow 0, N \rightarrow \infty$  получим

$$U(t' - t'; a^*, a) = \exp\left\{\frac{1}{2} [a^*(t')a(t') + a^*(t')a(t')] + i \int_t^{t'} \left[ \frac{1}{2i} (a^* a - a^* a) - h(a^*, a) \right] dt\right\} \prod_i \frac{da^* da}{2\pi i}.$$

Это выражение и есть ф-ла для оператора эволюции, возникающая в методе функционального интеграла.

Лит.: Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Введение в теорию квантовых полей, 1 изд., М., 1984; Березин Ф. А., Метод вторичного квантования, 2 изд., М., 1986; Славнов А. А., Фаддеев Л. Д., Введение в квантовую теорию надбрючных полей, 2 изд., М., 1988; Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Квантовые полы, 2 изд., М., 1980; Глишим Л., Джаффе А., Математические методы квантовой физики. Подход с использованием функциональных интегралов, пер. с англ., М., 1984. Л. О. Чехов.

**НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ** — то же, что Гаусса распределение.

**НОРМАЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ** (центростремительное ускорение) — составляющая ускорения точки при криволинейном движении, направленная по гл. нормали к траектории в сторону центра кривизны. Численно  $N$  у. равно  $v^2/\rho$ , где  $v$  — скорость точки,  $\rho$  — радиус кривизны траектории. При движении по окружности  $N$  у. может вычисляться по ф-ле  $R\omega^2$ , где  $R$  — радиус окружности,  $\omega$  — угл. скорость вращения этого радиуса.

При прямолинейном движении  $N$  у. равно нулю. **НОРМАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ** (собственные волны) — бегущие гармонич. волны в линейной динамической системе с пост. параметрами, в к-рой можно пренебречь поглощением и рассеянием энергии. Н. в. являются обобщением понятия *нормальных колебаний* на открытые области пространства и незамкнутые волноводные системы, в т. ч. на однородные и неоднородные безграничные среды, разл. типы волноводов и волновых каналов, струны, стержни, замедляющие системы, цепочки связанных осцилляторов и др.

Совокупность  $N$  в. обладает след. свойствами. 1. Каждая  $N$  в. является свободным (без стороннего воздействия) движением системы и может быть возбуждена независимо от других  $N$  в. спец. выбором нач. условий. 2. Произвольный волновой процесс в системе без источников может быть однозначно представлен в виде суперпозиции  $N$  в. 3. Спектр частот  $N$  в. является сплошным, реальные процессы могут быть представлены в виде интегральных сумм  $N$  в.

Понятие  $N$  в. применяется и к системам конечной протяженности, где, однако, их следует рассматривать как вынужденные движения, возбуждаемые гармонич. источниками, распределёнными вне области наблюдения, а совокупность  $N$  в. должна быть дополнена спариваниями.

дающими от источников «близкими» полями. В объемах резонаторов в диапазоне высочайших частот допустимо описание процессов в виде суперпозиций как нормальных колебаний с дискретным спектром, так и Н. в. со сплошным спектром. Такой дуализм динамики поведения свойств физ. объектов, включая природные каналы *внутренних* волн, волн дугами в океане, сейсмич. волн в земной коре, радиоканал Земля — ионосфера и др.

В набр. простом случае сред и волноводных систем, параметры к-рых не меняются вдоль нек-рого направления (напр., вдоль оси  $z$ ), Н. в. спускоидальны не только во времени, но и в пространстве и обладают неизменной поперечной структурой:  $a_1 = A_1(r_1, \omega) \cos(\omega t - k_2 z)$ , где  $\omega$  — циклич. частота,  $k_2$  — продольное волновое число (с ним связаны продольная длина волны  $\lambda_z = 2\pi/k_2$  и фазовая скорость  $v_{\Phi} = \omega/k_2$ ),  $A_1$  — амплитудное распределение одной из компонент волнового поля, зависящее только от поперечных к оси  $z$  координат  $r$ .

Связь между  $\omega$  и  $k_2$  определяет дисперсионные свойства Н. в. и, как правило, является неоднозначной — одному значению  $k_2$  соответствует набор Н. в. с разными частотами. Н. в., частоты и волновые числа к-рых принадлежат отд. непрерывной дисперсионной ветви многозначной ф-ции  $\omega = \omega(k_2)$ , относятся к одной нормальной моде системы (или просто моде). Моды различаются либо амплитудными и поляризац. структурами полей, либо фаз. природой процессов. В случаях вырождения одной дисперсионной ветви соответствует неск. линейно независимых мод, их число наз. кратностью вырождения. Возможны также вырождения Н. в. при фиксир. значениях  $\omega$  и  $k_2$ , соответствующих точкам пересечения или касания дисперсионных ветвей.

Одно из набр. важных свойств разложей полей по Н. в. заключается в распространении принципа суперпозиции на нек-рые энергетич. характеристики движения. Так, в произвольном гармонич. процессе (представляющем сложную картину пространств. биений Н. в. с одинаковыми частотами, но разными динамики волн) полный поток энергии (усредённый по периоду  $T = 2\pi/\omega$ ) равен сумме парциальных потоков энергии отд. Н. в. Волновые пакеты при своём распространении разбиваются на пакеты, объединяющие Н. в. одной моды; при этом полная энергия процесса равна сумме энергий одноמודовых пакетов. Понятие групповой скорости ( $v_{гр}^n = \partial\omega/\partial k_2$ ) может быть введено только для одноמודовых волновых пакетов.

В однородных безграничных средах Н. в. принято наз. однородные плоские волны, распространяющиеся в произвольных направлениях. В изотропных средах волновое число  $k_0$  не зависит от направления распространения, а поляризация поперечных волн может быть произвольной (двукратное поляризац. вырождение). В анизотропных и гиротропных средах  $k_0$  зависит от направления распространения, а поляризац. вырождение снимается (соответственно различают обыкновенные и необыкновенные Н. в.). На рис. 1 приведены дисперсионные ветви Н. в. в изотропной неэлектромагн. плазме. Частотные спектры поперечных эл.-магн. и ленгмюровских волн ограничены сигналу электронной плазм. частотой  $\omega_{pe}$ , спектр ионно-акустических волн ограничен сверху ионной плазм. частотой  $\omega_{pi}$ ; значения частот и волновых чисел, ограничивающих дисперсионную ветвь, наз. критическими для данной моды.

В акранир. волноводных системах (металлич. радиоволноводы, акустич. трубы, уругие пластинки, звуковые каналы в водоемах с твёрдым дном и т. д.) существует бесконечное счётное множество мод, поля к-рых локализованы в поперечных сечениях отражающими границами (экраними). Структура мод определяется формой поперечных двумерных нормальных колебаний ( $k_z = 0, \partial/\partial z = 0$ ), а критич. частоты мод — свойств. частотами этих колебаний  $\omega_n, n = 1, 2, \dots$

(рис. 2). При  $\omega < \omega_n$  данной моде соответствуют аксоненциально спадающие или нарастающие поля  $A_n(r_1) \cos \omega t \exp(\mp k_2 z)$ , каждое из к-рых, взятое в отдельности, не может переносить энергию. Однако комбинация сдвинутых по фазе спадающих и растущих полей

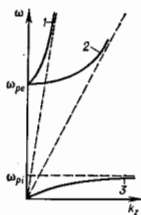


Рис. 1. Дисперсия нормальных волн в изотропной неэлектромагн. плазме: 1 — поперечные электромагнитные волны; 2 — ленгмюровские волны; 3 — ионно-акустические волны.

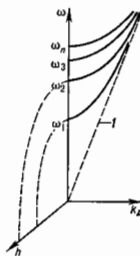


Рис. 2. Дисперсия нормальных волн в экранированных системах: 1 — квазисубкритическая мода; 2 — субкритическая мод.

определяют «просачивание» энергии через закрыт. область, где волны распространяться не могут, — т. н. туннельный эффект.

В волноводах с однородным заполнением фазовые  $v_{\Phi}^n$  и групповые  $v_{гр}^n$  скорости Н. в. в однородных плоских волн в среде заполнения  $v_{\Phi}^0, v_{гр}^0$  связаны универсальным соотношением

$$v_{\Phi}^{(n)}(\omega) \cdot v_{гр}^{(n)}(\omega) = v_{\Phi}^{(0)}(\omega) \cdot v_{гр}^{(0)}(\omega).$$

В коротковолновом пределе диапазона ( $k_2 \rightarrow \infty$ ) дисперсионные ветви мод стремятся к общей асимптоте (асимптотич. вырождение), совпадающей с ветвью однородных волн в среде заполнения (пунктирная линия 1 на рис. 2). В акустич. трубах и неоднородных радиоволноводах (в коаксиальных и многожильных кабелях, а также в открытых длинных линиях) эта асимптота сама является одной из ветвей Н. в. системы — т. н. квазисубкритич. Н. в., существующих при  $\omega \rightarrow 0$  и при любой частоте имеющих статич. поперечную структуру (напр., электростатическую и магнитоэлектрическую). В  $N$ -жильном кабеле квазисубкритич. моды  $N$ -кратно вырождены, что используется в системах многоканальной передачи информации.

В открытых волновых каналах поперечная локализация Н. в. происходит в результате *полюсного внутреннего отражения* либо на резких границах раздела сред (диэлектрич. волноводы, световоды), либо на плавных неоднородностях среды (звуковые каналы в океане и атмосфере, ионосферные радиоканалы, каналы внутр. волн в океане и др.). Совокупность локализованных (или захваченных) мод дискретна, но (в отличие от акранир. систем) не является полной. В волноводных каналах существует сплошное множество т. н. незахваченных мод, не спадающих при  $r_1 \rightarrow \infty$ .

Предельным случаем волновых каналов являются резкие границы раздела сред, вдоль к-рых могут распространяться поверхностные Н. в.

Понятие Н. в. обобщается на продольно-попереч. структуры: гофриров. волноводы, замедляющие системы, цепочки четырёхпольников, среды с равномерным широм анизотропии (напр., жидкие кристаллы) и т. д.

Значение Н. в. в физике, технике, природе определяется их уникальной структурной устойчивостью по

отношению к малым, а также к медленным и плавным изменениям параметров системы. Это свойство допускает возможность довольно широкого (хотя и не вполне строгого) распространения понятия Н. в. на системы со слабыми потерями и нелинейными взаимодействиями, искривлённые, деформованные, заполненные неоднородной средой, на системы с флуктуациями параметров и шероховатостями краёв. Метод Н. в. (т. е. разложение полей по Н. в. модельных систем) применяется при изучении природных волновых явлений (эл.-магн., акустич., гидродинамич., сейсмич., плазм., гравитационных и т. д.) и при конструировании волно-проводных тех. устройств.

Лит.: Горелки Г. С., Колебания и волны, 2 изд., М., 1959; Вайнштейн Л. А., Электродинамические волны, 2 изд., М., 1988; Бреховский Л. М., Волны в слоистых средах, 2 изд., М., 1973; Заварский В. Ю., Вычисление волновых полей в открытых областях и волноводах, М., 1972; Никольский И. В., Виброакустика Т. И., Электродинамика и распространение радиоволн, 3 изд., М., 1989.

М. А. Мильер, Г. В. Пермитин.  
**НОРМАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ** (нормальные моды) — собственные (свободные) гармонич. колебания линейных динамич. систем с пост. параметрами, в к-рых отсутствуют как потери, так и приток извне колебат. энергии. Каждое Н. к. характеризуется определ. значением частоты, с к-рой осциллируют все элементы системы, и формой — покривом, распределением амплитуд и фаз по элементам системы. Линейно независимые Н. к., отличающиеся формой, но имеющие одну и ту же частоту, наз. в р о з ж д е н н ы м и. Частоты Н. к. наз. собственными частотами системы.

В дискретных системах, состоящих из *N* связанных гармонич. осцилляторов (напр., механич. маятников, эл.-магн. колебат. контуров), число Н. к. равно *N*. В распределённых системах (струна, мембрана, резонатор) существует бесконечное, но счётное множество Н. к. Совокупность Н. к. обладает свойством полноты в том смысле, что произвольное свободное движение колебат. системы может быть представлено в виде суперпозиции Н. к.; при этом полная энергия движения распадается на сумму парциальных энергий, запасённых в каждом Н. к. Т. о., система ведёт себя так, как набор автономных объектов — независимых гармонич. осцилляторов, к-рые могут быть выбраны в качестве обобщённых нормальных координат, описывающих движение в целом. Однако в динамич. системах могут существовать и собств. движения, не сводящиеся к Н. к. (равномерные вращения, пост. ток и др.).

При внеш. возбуждении системы Н. к. в значит. мере определяют резонансные свойства системы, хотя, строго говоря, они перестают быть независимыми. Резонанс может возникнуть лишь в том случае, когда частота гармонич. внеш. воздействия близка к одной из собств. частот системы либо к их линейной комбинации, если внеш. воздействие меняет параметры системы (*параметрический резонанс*). При резонансном возбуждении системы вынужденное оказывается и распределение воздействия — макс. эффект достигается при соблюдении не только временного, но и «пространственного» синхронизма (см. Волны).

В линейных системах с переменными параметрами при выполнении определ. условий также возможно представление движений в виде суперпозиции Н. к., отличающихся, однако, от гармонических. Понятие Н. к. может быть приближённо распространено на системы, содержащие неконсервативные и нелинейные элементы, если их воздействие приводит к медленным изменениям амплитуд и фаз квазигармонич. Н. к. (в масштабе периода самих Н. к. или периода бешей между ними).

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; Горелки Г. С., Колебания и волны, 2 изд., М., 1959; Краффорд Ф., Волны, пер. с англ., 3 изд., М., 1984.

М. А. Мильер, Г. В. Пермитин.  
**НОРМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ** — 1) физ. условия, определяемые давлением  $p = 101\ 325$  Па (760 мм рт. ст., нормальная атмосфера) и темп-рой  $t = 273,15$  К ( $0^\circ$ С), при

к-рых молярный объём газа  $V_0 = 2,2414 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/моль. Нормальное ускорение свободного падения принимают равным  $g_n = 9,80665$  м/с<sup>2</sup>. 2) Условия применения средств измерения, при к-рых влияющие на их показания величины (темп-ра, питающее напряжение и др.) имеют установленные (нормальные) значения или находятся в пределах нормальной области значений. Н. у. указываются на шкалах средств измерений, в стандартах на них, техн. описаниях и инструкциях к их использованию. Пределы допускаемых осн. погрешностей измерений устанавливаются для Н. у.

**НОРМАЛЬНЫЙ ТОН** — основной тон музыкальной настройки. За Н. т. принят звук «ля» первой октавы с частотой 440 Гц. Воспроизводится он эталонным камертоном. По Н. т. устанавливают музыкальный строй инструментов.

**НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ (НРБ)** — межведомств. документ, регламентирующий допустимые количества, уровни воздействия ионизирующих излучений с учётом облучения человека извне и изнутри. В отличие от публикации Междунар. комиссии радиац. ашциты, к-рые имеют рекомендат. характер, базирующиеся на них НРБ в СССР носят законодат. характер.

Первичными нормативами являются предельно допустимая доза (ПДД) облучения работающего персонала (категория А) и предел дозы (ПД) облучения огранич. части населения (категория Б) (в единицах эквивалентной дозы) для различных, т. в. критич. органов человека и тела в целом. В порядке убывания радиочувствительности установлены три группы критич. органов, для к-рых существуют разл. предельные дозы (табл. 1).

Табл. 1. — Дозовые пределы, бар в год

Группа органов	ПДД	ПД
I	5	0,5
II	15	1,5
III	30	3

I группа — всё тело, голы и красный костный мозг;  
 II группа — мышцы, подкожная жировая ткань, лёгочн. ткань, селезёнка, желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), лёгкие, хрусталик глаза и др. органы (за исключением тех, к-рые относятся к III группе);  
 III группа — кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, лодыжки и стопы.

Предельные дозы, установленные НРБ, не включают дозу, обусловленную естеств. радиац. фоном, и дозу, получаемую при медицинском обследовании и лечении. Вторичными нормативами являются дозы, допускаемые при проектировании средств радиац. контроля. Для категории А это — предельно допустимое годовое поступление радиоуклида через органы дыхания (ПДДА); допустимое содержание радиоуклида в критич. органе (ДСА); допустимая мощность дозы излучения (ДМДА); допустимая плотность потока (ДППА); допустимая концентрация радиоуклида в воздухе рабочей зоны (ДКА); допустимое загрязнение поверхности (ДЗА). Для категории Б — предел годового поступления радиоактивных веществ через органы дыхания и пищеварения (ПППВ); допустимая концентрация радиоуклида в атм. воздухе и воде (ДКВ); допустимая мощность дозы (ДМДБ); допустимая плотность потока (ДППБ) (табл. 2).

В НРБ включены также предельно допустимые кол-ва радиоакт. инертных газов в воздухе и допустимые концентрации смеси радиоуклидов неизвестного (или частично известного) состава, а также допустимая плотность радиоакт. загрязнений разл. поверхностей (от кожных покровов человека до транспортных средств). Для большинства радиоуклидов все предельно допустимые дозы и концентрации рассчитаны исходя из равновесного их накопления в органах. При сохранении годового предельно допустимого поступления в течение всей профессиональной работы человека доза излучения за год в критич. органе не превысит значения предельно допустимой дозы за год. Для отд. долгоживущих радиоуклидов, не достигающих равнов.

Табл. 2. — Значения допустимого содержания и поступления некоторых радионуклидов

Радионуклид, период полураспада $T_{1/2}$	Критич. орган	ДСА, мкКи	ППП, мкКи/год	ДКА, Ки/д	ПГП, мКи/год		ДКв, Ки/л	
					через органы дыхания	через органы пищеварения	в атмосферном воздухе	в воде
<sup>232</sup> Th 12,35 лет	Всё тело	$1,2 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
<sup>137</sup> Cs 5730 лет	Жировая ткань	$1,6 \cdot 10^3$	$8,7 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$8,7 \cdot 10^3$	$6,6 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$
<sup>90</sup> Sr 50,5 сут	Кости	3,9	69	$2,8 \cdot 10^{-11}$	6,9	9,6	$9,4 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
	Лёгкие	1,5	87	—	8,7	22	—	—
<sup>90</sup> Sr 29,12 лет	ЖКТ	—	—	—	—	28	—	—
	Лёгкие	2,0	2,9	$1,2 \cdot 10^{-13}$	0,29	0,32	$4,0 \cdot 10^{-14}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$
<sup>131</sup> I 8,04 сут	ЖКТ	0,76	14	—	1,4	28	—	—
	Щитовидная железа	0,07	10	$4,2 \cdot 10^{-12}$	1	0,8	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
<sup>137</sup> Cs 30 лет	Лёгкие	2,8	$8,0 \cdot 10^3$	—	80	51	—	—
	ЖКТ	—	$8,0 \cdot 10^3$	—	80	51	—	—
<sup>226</sup> Ra 1600 лет	Всё тело	33	$1,6 \cdot 10^3$	—	16	12	—	$1,5 \cdot 10^{-8}$
	Печень	3,5	—	—	—	14	—	—
<sup>232</sup> Th $1,405 \cdot 10^{10}$ лет	Селёзёнка	0,34	—	—	—	18	—	—
	Мышцы	14	—	—	—	19	—	—
<sup>226</sup> Ra 1600 лет	Лёгкие	2	36	$1,4 \cdot 10^{-11}$	3,6	—	$4,9 \cdot 10^{-13}$	—
	ЖКТ	—	—	—	—	35	—	—
<sup>232</sup> Th $1,405 \cdot 10^{10}$ лет	Кости	0,051	0,37	—	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$4,3 \cdot 10^{-9}$	—	$5,4 \cdot 10^{-11}$
	Почки	0,0011	35	—	3,5	4,6	—	—
<sup>238</sup> U 4,5 · 10 <sup>9</sup> лет	ЖКТ	0,0038	0,062	$2,5 \cdot 10^{-14}$	$6,2 \cdot 10^{-9}$	13	$8,5 \cdot 10^{-13}$	—
	Лёгкие	—	—	—	—	13	—	—
<sup>238</sup> U 4,5 · 10 <sup>9</sup> лет	Кости	0,021	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,016	$2,5 \cdot 10^{-17}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$
	Почки	0,0029	$7,7 \cdot 10^{-9}$	—	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0,04	—	—
<sup>238</sup> U 4,5 · 10 <sup>9</sup> лет	Лёгкие	0,0087	$1,2 \cdot 10^{-9}$	—	$1,2 \cdot 10^{-9}$	—	—	—
	ЖКТ	—	—	—	—	14	—	—
<sup>238</sup> U 4,5 · 10 <sup>9</sup> лет	Почки (хим. токсичность)	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0,37	—	0,37	0,05	—	$1,2 \cdot 10^{-9}$
	Кости	0,92 мг	550 мг/год	—	55 мг/год	1400 мг/год	—	1,8 мг/л
<sup>238</sup> U 4,5 · 10 <sup>9</sup> лет	Лёгкие	0,024	0,74	—	0,074	1,9	—	—
	ЖКТ	36 мг	1100 мг/год	—	110 мг/год	2800 мг/год	—	—
<sup>238</sup> U 4,5 · 10 <sup>9</sup> лет	Лёгкие	0,0067	0,15	$5,9 \cdot 10^{-14}$	0,15	—	$2,0 \cdot 10^{-12}$	—
	ЖКТ	13 мг	220 мг/год	$8,8 \cdot 10^{-9}$	22 мг/год	—	$3,0 \cdot 10^{-9}$	—
<sup>238</sup> U 4,5 · 10 <sup>9</sup> лет	ЖКТ	—	—	—	—	13	—	—
	Кости	0,02	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$9,0 \cdot 10^{-12}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	1,8	$3,0 \cdot 10^{-17}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
<sup>238</sup> U 4,5 · 10 <sup>9</sup> лет	Лёгкие	0,008	$4,7 \cdot 10^{-9}$	—	$4,7 \cdot 10^{-9}$	—	—	—
	ЖКТ	—	—	—	—	12	—	—

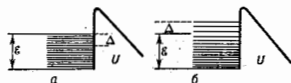
весного накопления в органе в течение жизни (<sup>226</sup>Ra, <sup>90</sup>Sr, <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U и др.), значения доз и концентраций рассчитаны исходя из условия, чтобы пределы достигались лишь к концу профессиональной работы (50 лет для категории А) или всей жизни (70 лет для категории Б). Допустимые кол-ва короткоживущих радионуклидов азота, кислорода и углерода, не концентрирующихся в теле человека, рассчитаны исходя из внешнего β- и γ-облучения кожи.

Лит.: Нормы радиационной безопасности НРБ76/87, 3 изд., М., 1988.

**НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ** (носители тока) — подвижные частицы или квазичастицы, участвующие в процессах электропроводности. Перенос заряда в твёрдых телах может осуществляться движением электронов и дырок из частично заполненных зон (см. *Зонная теория*), ионов (*дислокации*), а также заряженных дефектов кристаллич. решётки — *вакансий*, межузельных атомов или примесей. Знак основных Н. а. в т. т. можно определить, напр., по знаку постоянной Холла (см. *Холла эффект*). Тип основных Н. а. в т. т. может меняться в зависимости от внеш. условий (напр., темп-ры) и предвосторной обработки (напр., облучения). В случае сильного электрон-фонового взаимодействия в электропроводах могут возникать вклад поларонов.

Лит. см. при ст. *Твёрдое тело*, *Полупроводники*, *Металлы*.  
**НОТТИНГЕМА ЭФФЕКТ** — выделение тепла на катоде при *автомлектронной эмиссии* и поглощение тепла при *термоэлектронной эмиссии*, обусловленные разницей между ср. энергией электронов, покидающих его. При автоэлектронной эмиссии (при низкой темп-ре; рис., а) распре-

деление электронов по энергиям практически не отличается от *ферми-распределения* при абс. нуле. Поэтому сквозз потенциал барьер  $U$  в вакуум уходит электроны, энергия к-рых несколько ниже *ферми-уровня* (на величину  $\sim \Delta\phi$ ). При этом происходит нагревание эмиттера за счёт электронов, приходящих из эмиттера. Если на освобождающиеся уровни. В случае термоэлектронной эмиссии (при высокой темп-ре) электроны уходят



с уровней, лежащих выше уровня Ферми (рис., б). Заполнение этих уровней электронами, приходящими из цепи, приводит к охлаждению эмиттера. Открыт У. Б. Ноттингемом (W. B. Nottingham) в 1941.

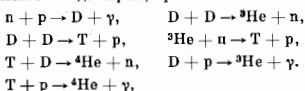
Лит. см. при ст. *Атомноэлектронная эмиссия*, *Термоэлектронная эмиссия*.

**НУКЛЕОСИНТЕЗ** (от лат. nucleus — ядро и греч. synthesis — соединение, составление) в природе — образование в ядрах реакций, происходящих на разл. стадиях эволюции вещества Вселенной, наблюдаемой распространённости элементов и их изотопов. Проблема Н. — это проблема происхождения хим. элементов. Н. можно разделить на три гл. стадии: космологич. Н., синтез ядер в звёздах и во взрывах звёзд, Н. под действием космич. лучей.

Космологич. Н. — это синтез ядер на раннем этапе (до образования звёзд) эволюции вещества во Вселен-



пой. Согласно горячей Вселенной теории, атомные ядра, более сложные и тяжёлые, чем протон, стали образовываться через  $\approx 100$  с после начала расширения Вселенной, когда в достаточном количестве существовали свободные протоны и нейтроны, при темп-ре  $T \sim 10^9$  К начали протекать термоядерные реакции синтеза самых лёгких элементов — дейтерия, трития и гелия:

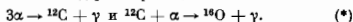


Стандартная горячая модель хорошо объясняет наблюдаемое обилие (относит. содержание) первичного (т. е. возникшего на этом этапе эволюции Вселенной)  ${}^4He$  в астрофиз. объектах ( $\approx 22\%$  по массе). Однако образование более тяжёлых ядер на ранней стадии расширения Вселенной становится невозможным, т. к. уменьшение темп-ры и плотности вещества ограничивает реакции синтеза и не позволяет преодолеть т. н. щели в спектре масс атомных ядер при массовых числах  $A = 5$  и 8, обусловленные отсутствием в природе стабильных нуклидов  ${}^4He$ ,  ${}^8Li$ ,  ${}^8Be$ . Образование следующих за гелием элементов связано с более поздними этапами эволюции Вселенной.

Большинство известных хим. элементов возникло через миллиарды лет после начала расширения Вселенной — в эпоху существования звёзд, галактик и космич. лучей. Происхождение дейтерия, лития, бериллия, бора в общей проблеме Н. представляет самостоятел. интерес, т. к. эти элементы легко разрушаются в термоядерных реакциях (их равновесные концентрации малы), и поэтому их эфф. «производство» возможно лишь в неравновесных процессах. Такие неравновесные процессы предполагаются в рамках нек-рых моделей космолитч. Н., напр. образование дейтерия в реакции  ${}^4He$  с антипротонами:  $p + {}^4He \rightarrow D + p$ . Однако наиб. распространённым является представление о динамичном образовании лёгких элементов с помощью реакций скапливания при взаимодействии галактич. космических лучей с межзвёздной средой: быстрые протоны и альфа-частицы в составе космич. лучей бомбардируют ядра тяжёлых элементов межзвёздной среды и Солнечной системы, вызывая их расщепление на лёгкие ядра; быстрые ядра углерода, азота, кислорода в составе космич. лучей, взаимодействуя с межзвёздными ядрами водорода и гелия, также могут расщепиться на ядра лёгких элементов. Расчёты показывают, что эти ядерные реакции могут производить наблюдаемые обилия  ${}^6Li$ ,  ${}^9Be$ ,  ${}^{10}B$ . Трудности возникают лишь при объяснении необычного изотопного состава  $Li$  и  $B$  (резко выраженное преобладание нечётных изотопов), а также при объяснении «производства»  $D$  и  ${}^3He$ , к-рые в указанных выше механизмах разрушаются явнo быстрее, чем создаются. Эффективным дополнит. источником синтеза лёгких элементов, кроме космич. лучей, могут служить взрывы сверхновых звёзд. Распространение ударной волны во внеш. оболочках сверхновой и последующее охлаждение могут привести к реакциям синтеза  $p + p \rightarrow D + \gamma$ ,  $p + D \rightarrow {}^3He + \gamma$ , а реакции скапливания на ядрах углерода, азота и кислорода, инициированные ударной волной, производят ядра  $Li$ ,  $Be$ ,  $B$ .

Происхождение подавляющего большинства изотопов тяжёлых хим. элементов, начиная с углерода и кончая долгоживущими трансурановыми нуклидами (а возможно, и сверхтяжёлыми), объясно синтезу ядер в звёздах и во взрывах звёзд. Ядра элементов от углерода до никеля образуются в недрах звёзд в условиях высокой темп-ры в реакциях термоядерного синтеза. Ядра более тяжёлых элементов образуются, скорее всего, в массивных звёздах и во взрывах звёзд в результате последоват. реакций захвата нейтронов. Ядерный

синтез в звёздах можно разделить на статистический Н. (синтез ядер на равновесной гидростатич. стадии эволюции звёзд) и взрывной нуклеосинтез (синтез ядер при взрывах звёзд). К механикам статич. Н. прежде всего следует отнести водородный цикл и углеродно-азотный цикл в звёздах гл. последовательности (см. Герцишпрунга — Рассела диаграмма), к-рые обеспечивают превращение водорода в гелий, создавая нек-рый избыток гелия и азота по отношению к их первичному содержанию. Образование углерода и кислорода происходит на той стадии эволюции звёзд-гигантов (см. Эволюция звёзд), когда в их недрах полностью выгорает водород и начинается горение гелия. При темп-рах, соответствующих этому процессу ( $T \sim 10^8$  К), эффективно протекают ядерные реакции синтеза:



При более высоких темп-рах ( $T \sim 10^9$  К) становятся возможными реакции горения углерода и кислорода с образованием изотопов элементов от неона до кремния. Во взрывном Н. сеть ядерных реакций (рис. 1), протекающих при  $T \sim 3 \cdot 10^9 - 10^{10}$  К в условиях термодинамич. равновесия (т. н.  $\epsilon$ -процесс), приводит к образованию железа и соседних с ним элементов в области

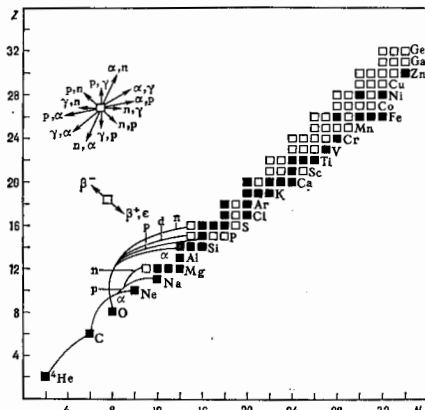


Рис. 1. Сеть реакций нуклеосинтеза, приводящая к образованию стабильных (■) и радиоактивных (□) ядер с числом протонов (Z) от 2 до 34.

«железного пика» (максимума на кривой распространённости нуклидов близки  $A = 56$ ). В верх. половине рис. (слева) стрелками показаны ядерные превращения, происходящие в результате взаимодействия ядер с гамма-квантами, нейтронами, протонами и альфа-частицами (направления стрелок соответствуют перемещению ядер по диаграмме в результате указанных реакций). Стрелки с символами  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  и  $\epsilon$  соответствуют перемещениям по диаграмме в результате  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ -распадов и электронного захвата. Кривыми показаны пути («каналы») реакций «горения» гелия (\*), углерода и кислорода ( ${}^{12}C + {}^{12}C$ ,  ${}^{12}C + {}^{16}O$ ,  ${}^{16}O + {}^{16}O$ ) с испусканием протонов (p), нейтронов (n), дейтронов (d) и альфа-частиц ( $\alpha$ ).

Ядра железа характеризуются макс. энергией связи на нуклон, поэтому образование элементов тяжелее железа объясняют процессами, существенно отличными от реакций термоядерного синтеза, — процессами захвата нейтронов. Различают два вида реакций захвата яд-

рами нейтронов,  $k$ -рые протекают в астрофиз. объектах:  $s$ -процесс — медленный захват нейтронов, при котором образовавшиеся неустойчивые ядра распадаются раньше, чем успеет присоединиться следующий нейтрон;  $r$ -процесс — быстрый последователь захват большого кол-ва нейтронов, опережающий  $\beta$ -распад. Пути нейтронного захвата в этих процессах показаны на рис. 2. Медленный нейтронный захват развивается вдоль линии стабильности ядер (область на диаграмме  $Z-N$ , занятая стабильными ядрами) при умеренных концентрациях свободных нейтронов ( $\sim 10^7-10^8 \text{ см}^{-3}$ ). Положение дорожки (трека)  $s$ -процесса зависит от сечений нейтронного захвата при энергиях нейтронов  $\approx 30 \text{ кэВ}$  и от свойств ядер в полосе стабильности. Этот процесс приводит к синтезу изотопов мн. тяжёлых элементов вплоть до  $^{209}\text{Bi}$ . Осн. звено в цепи  $s$ -процесса — нейтронный захват с последующим  $\beta$ -распадом — хорошо моделируется в эксперименте, и большинство ядерных параметров, необходимых для расчёта  $s$ -процесса, можно изучать в лаб. условиях. Особенно важны в этом отношении измерения сечений нейтронного захвата  $\sigma_{n,\gamma}$  при энергиях нейтронов, соответствующих звёздным темп-рам ( $E_n \sim 30 \text{ кэВ}$ ). Имеющиеся эксперим. данные по сечениям  $\sigma_{n,\gamma}$  в этой области энергий подтверждают осн. вывод теории  $s$ -процесса: выходы ядер в установившейся цепи  $s$ -процесса для малых областей изменения массового числа обратно пропорциональны ср. сечениям нейтронного захвата. Астрофиз. место (т. е. астрофиз. объекты или области внутри них, где возможен процесс)  $s$ -процесса должно обладать темп-рой  $T \geq 10^8 \text{ К}$ , достаточной для осуществления ядерных реакций, освобождающих нейтроны с плотностью потока  $\sim 10^{15}-10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и длительностью облучения  $\sim 10^8 \text{ лет}$ . В качестве источников таких нейтронов были предложены реакции  $^{22}\text{Ne} + \alpha \rightarrow ^{24}\text{Mg} + n$ ,  $^{13}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + n$ , протекающие в недрах красных гигантов при горении гелия и при попадании водорода в области, содержащие гелий и углерод:  $p + ^{14}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N} + \gamma$ ,  $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu$ ,  $^{13}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + n$ . Возможен также импульсный нейтронный захват, приводящий к образованию тяжёлых ядер в недрах звезды за счёт периодически повторяющихся всплесков  $e$ -гелиевой оболочки, перемежающихся водород и углерод и обеспечивающих необходимую высокую темп-ру. Этот импульсный механизм создаёт условия протекания  $s$ -процесса для широкого класса звёзд средних и больших масс — от  $3 M_{\odot}$  до  $10 M_{\odot}$ .

Процесс быстрого нейтронного захвата, в отличие от  $s$ -процесса, развивается в области ядер, сильно обогащённых нейтронами (рис. 2). Положение трека  $r$ -процесса зависит от скорости  $\beta$ -распада этих ядер, энергий нейтронов и от кач. условий процесса (тем-ры и концентрации нейтронов). Для протекания  $r$ -процесса необходимы высокие концентрации нейтронов (больше  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) и достаточно большое обилие «зародышевых» (стартовых) ядер. Астрофиз. место  $r$ -процесса остаётся до конца не выясненным, хотя существует неск. моделей развития  $r$ -процесса в разл. звёздных явлениях. В классич. типе  $r$ -процесса добавление нейтронов идёт до тех пор, пока не установится равновесие прямой и обратной реакций  $(n, \gamma) \rightleftharpoons (\gamma, n)$ . В этот момент происходит  $\beta$ -распад, увеличивающий заряд ядра на единицу и настолько же уменьшающий число нейтронов. Новое ядро ( $Z+1, N-1; Z$  — число протонов,  $N$  — число нейтронов в ядре) может опять захватывать нейтроны, пока не достигнет др. критич. точки — т. в. точки ожидания  $\beta$ -распада. Образовавшееся ядро, обогащённое нейтронами, по мере истощения нейтронного потока постепенно возвращается к линии ядерной стабильности путём последоват.  $\beta$ -распадов. Считается, что равновесный  $r$ -процесс может протекать вблизи сильнонейтронизованного ядра сверхновой звезды (см. *Нейтронизация вещества*). Однако обсуждается и др. тип  $r$ -процесса, развивающийся во внеш. оболочках сверхновой при прохождении через них

сильной ударной волны. В этой модели дискуссионными являются вопросы происхождения достаточно больших потоков нейтронов и необходимого для осуществления  $r$ -процесса обилия адронных ядер. Протекание  $r$ -процесса приводит к образованию трансактивных нуклидов ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  и др.). Поэтому временная шкала  $r$ -процесса должна быть достаточно длинной, для того чтобы успели синтезироваться эти нуклиды, и в то же время она должна соответствовать скорости взрывных процессов, развивающихся в течение неск. секунд. Результаты расчёта скоростей образования ядер  $r$ -процесса могут дать непосредств. ответ на принципиально важный вопрос, обсуждающийся более 25 лет., — возможен ли в природе синтез сверхтяжёлых элементов. Этот ответ во многом зависит от результатов исследования вклада процессов истощения нейтронов при  $\beta$ -распадах (аппазахивающие нейтроны) и делении, происходящего сразу вслед за  $\beta$ -распадом. Для нейтронобогащённых ядер, входящих на трек  $r$ -процесса, такие процессы особенно существенны.

Разделение  $n$  в реакциях захвата ядрами нейтронов на  $s$ - и  $r$ -процессы не является обязательным: не исключено, что нейтронный захват в астрофиз. объектах представляет собой сложную комбинацию этих процес-

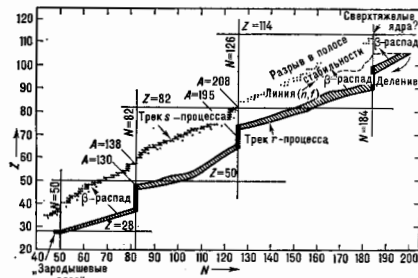


Рис. 2. Пути нейтронного захвата в  $s$ - и  $r$ -процессах.  $r$ -Процесс рассчитан для начальных температур  $1,8-10^8 \text{ К}$  и концентрации нейтронов  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . «Задержива» присоединения нейтронов в  $s$ - и  $r$ -процессах происходит, когда в ядрах числа нейтронов  $N$  становятся магическими ( $N = 50, 82, 126$ ). Этому соответствуют низк. выходы нуклидов при массовых числах  $A$ , указанных на диаграмме наклонными линиями. Горизонтальными линиями показаны магические числа протонов, вертикальными — магические числа нейтронов. Направление  $\beta$ -распада показано стрелками. Линия (п, f) соответствует ядрам, которые испытывают деление при присоединении нейтрона. Разрыв в полосе стабильности связан со спонтанным делением ядер. Деление обуславливает  $r$ -процесс в области ядер с  $Z \geq 100$ , однако точная граница  $r$ -процесса не установлена.

сов. Тем не менее такой подход позволяет объяснить осн. черты наблюдаемой распространённости нуклидов за «железные пики». Пики распространённости при  $A = 90, 138, 208$  соответствуют рекамому повышению выходов в цепи  $s$ -процесса стабильных ядер с магич. числами нейтронов соответственно  $N = 50, 82, 126$ . Точно так же пики распространённости нуклидов при  $A = 80, 130, 195$  соответствуют большому выходу на дорожке  $r$ -процесса нейтронобогащённых нуклидов с теми же числами нейтронов  $N = 50, 82, 126$  (рис. 2).

Многие стабильные изотопы тяжёлых элементов, начиная с селена ( $^{74}\text{Se}$ ,  $^{76}\text{Se}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  и т. д.), оказываются в стороне от путей нейтронного захвата и не могут быть образованы в  $s$ - и  $r$ -процессах. Такие обеднённые нейтронами ядра с малой распространённостью получили назв. «обеднённые». Предполагается, что в их образовании существ. роль играют ядерные реакции захвата протонов ( $p, \gamma$ ), ( $p, n$ ) в звёздах, а также реакции фо-

тоотщепления нейтрона ( $\gamma, n$ ), реакции слабого взаимодействия

$$e^+ + (A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + \bar{\nu},$$

$$\gamma + (A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^+ + \bar{\nu}$$

и упоминавшиеся выше реакции скапливания. Проблема происхождения обобщённых ядер пока окончательно не решена. Не исключено, что гл. механизм их образования связан со взрывами сверхновых, в к-рых образуются большие потоки нейтронов, вызывающие ядерные превращения типа  $\nu + (A, Z - 1) \rightarrow (A, Z) + e^-$ .

Изложенные выше контуры теории Н. можно считать построенными. Теория успешно описывает гл. особенности кривой распространённости нуклидов в Солнечной системе. Однако остаются нерешёнными многие проблемы, связанные с соотношением пиков наблюдаемых выходов, аномалиям в содержаниях нуклидов и элементов в разл. астрофиз. объектах, неоднородностями в выборе астрофизического места процессов ядерного синтеза.

Лит.: Фаулер У. А., Экспериментальная и теоретическая ядерная астрофизика, поиски происхождения элементов, пер. с англ., "УФН", 1985, т. 146, с. 441; Ядерная астрофизика, пер. с англ., М., 1986; Крамер в р. Ф. И. Я. М., Чечев В. П., Синтез элементов во Вселенной, М., 1987.

В. П. Чечев, Я. М. Крамерской.

**НУКЛИД** (от лат. nucleus — ядро) — любое атомное ядро (соответственно атом) с заданными числами протонов ( $Z$ ) и нейтронов ( $N$ ). Общее обозначение Н. имеет вид  ${}^A_Z X$ , где  $X$  — символ хим. элемента,  $A = Z + N$  — массовое число Н., обладающие одинаковыми  $Z$ , наз. *изотопами*. Радиоакт. ядра наз. радио- или *нуклидами*. М. Массы Н., выраженная в атомных единицах массы, округлённо равна  $A$  (массовому числу); только масса  ${}^{12}C$  точно равна 12 (см. *Атомная единица массы*). Общее число известных стабильных и радиоактивных Н. превышает 2000.

Систематизация Н. осуществляется в виде табл. (см. *двухую вкладку*), разработанной В. Зелеман-Эггербертом (W. Seelmann-Eggbert), Г. Пеннингеном (G. Penning), Г. Мюнцлем (H. Münzel) и Г. Клеве-Небенкусом (H. Kewen-Nebenius) в Карлсруэ.

В табл. каждому Н. отвечает чёрная или цветная клетка. Клетки каждого горизонтального ряда содержат изотопы элемента,  $Z$  к-рого приведено слева, перед началом ряда; белая клетка в чёрной рамке содержит характеристики из отдельного Н., а хим. элемента в целом, к к-рому относятся данные изотопы. В ней указаны ат. масса элемента и эфф. сечение  $\sigma$  захвата тепловых нейтронов ( $\times 10^{28} \text{ м}^2$ ). В каждом горизонтальном ряду Н. расположены в порядке возрастания  $N$  (указаны внизу), причём в ядре каждого следующего содержится на 1 нейтрон больше, чем в ядре предыдущего. Горизонтальный ряд, расположенный сверху, включает Н. с  $Z$  на 1 больше, чем в Н. предыдущего ряда, и т. д. Вертикальные колонки табл. содержат Н. с одинаковыми  $N$ , но разными  $Z$  и  $A$  (изотопы). По диагоналям, идущим из верхнего левого угла в правый нижний, расположены Н. с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$  (*изобары*).

Стабильные Н. помещены в чёрные клетки, радионуклиды — в цветные. Если радионуклид принадлежит к числу природных долгоживущих (т. е. существует на Земле с момента её формирования), то верхняя часть клетки закрашена чёрным. В каждой клетке, в к-рой приведён стабильный Н. или природный долгоживущий радионуклид, указана его относит. распространённость в природной смеси изотопов (в % по массе). Два слагаемых  $\sigma$  соответствуют сечениям образования нуклидов в основном ( $g$ ) и изомерном ( $m$ ) состояниях.

Цвет клетки обозначает тип радиоакт. распада: красный отвечает  $\beta^+$ -распаду или электронному захвату ( $\epsilon$ ); синий —  $\beta^-$ -распаду (см. *Beta-распад* ядер); жёлтый — *альфа-распаду*; зелёный — спонтанному де-

лению ядра ( $sf$ ); корчпневый — протонному распаду (см. *Протонная радиоактивность*). В цветных клетках приведены период полураспада  $T_{1/2}$  радионуклида в микросекундах ( $\mu s$ ), миллисекундах ( $ms$ ), секундах ( $s$ ), минутах ( $m$ ), часах ( $h$ ), сутках ( $d$ ), годах ( $a$ ), а также энергия испускаемых при распаде частиц (в МэВ) или  $\gamma$ -квантов (в кэВ). В нек-рых случаях даны значения сечений ядерных процессов. Так,  $\sigma_{\text{отс}}$  отвечает сечению деления под действием нейтронов,  $\sigma_{\text{нр}}$  и  $\sigma_{\text{ад}}$  — *адверсионная реакция* ( $n, p$ ) и ( $n, \alpha$ ),  $\sigma_{\text{абс}}$  — поглощению нейтронов (все значения  $\times 10^{28} \text{ м}^2$ ).

Если радионуклид распадается в основном или в метастабильном состоянии, то это обозначено буквами  $g$  и  $m$ . Если распад радионуклида происходит по нек. каналам, то тип распада указывается раскрашенной, а вероятность примерно соответствует закрашенной площади внутри клетки. Так, вероятность распада  $\leq 5\%$  обозначена треугольником слева вверху или справа внизу. При разделении клетки диагонально пополам цвет левой верш. половины указывает тип распада с вероятностью  $\geq 50\% \leq 95\%$ , а цвет правой нижней половины — распад с вероятностью  $\geq 5\% \leq 50\%$ . У нек-рых нуклидов наряду с основным типом распада наблюдаются дополнительные, напр. для  ${}^{210}Pb$  помимо  $\beta^-$  также наблюдается в единичном акте распада испускание  $\beta_{2n}$ ,  $\beta_{3n}$ ,  $\beta_{\alpha}$ .

Если у Н. известно метастабильное состояние (изомер, см. *Изотопы ядерная*), в клетке выделен прямоугольник, в к-ром приводятся сведения об изомерном состоянии, а в остальной части — об основном (если на основании имеющихся данных сделать вывод о том, какое состояние основное, а какое — метастабильное, невозможно, приводится знак  $\leftrightarrow$ ). Испускание  $\gamma$ -квантов при переходе из метастабильного состояния в основное отмечено как  $\gamma$ . Если переход метастабильного состояния в основное возможен равными путями, то это отражено в раскраске маленького прямоугольника. В случае перехода метастабильного состояния и основное за счёт испускания  $\gamma$ -квантов этот прямоугольник не окрашен.

Белые и цветные клетки, не обведённые жирной линией, означают, что Н. либо не обследовался, либо имеющиеся данные носят ориентировочный характер, внизу может быть указано предположительное излучение в акте распада. Сведения о Н. или их характеристиках, вызывающие сомнения, иногда отмечены знаком вопроса; «no» означает отсутствие. Стрелка с числом на полях (%) означает образование изобаров при делении  ${}^{235}U$  под действием тепловых нейтронов.

Лит.: Сел и нов И. П., Изотопы, т. 1—3, М., 1970; Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения, пер. с англ., ч. 1—2, М., 1987. С. С. Бердосюс.

**НУКЛОН** (от лат. nucleus — ядро) — общее наименование для протона и нейтрона, являющихся составными частями атомных ядер. См. также *Изотопическая инвариантность*.

**НУКЛОННЫХ АССОЦИАЦИЙ МОДЕЛЬ** — модель атомного ядра, основанная на представлении о ядре как о системе кластеров, или нуклонных ассоциаций, определённого типа, как правило,  $\alpha$ -кластеров. Простейший вариант Н. а. м. —  $\alpha$ -кластерная модель — был сформулирован в 1937 Дж. А. Уиллером (J. A. Wheeler). Эксперим. данные по энергиям связи  $\epsilon_{\text{св}}$  лёгких ядер указывают на повышенную энергию связи ядер с равным и чётным числом нейтронов ( $N$ ) и протонов ( $Z$ ):  $N = Z = 2n$  ( $n$  — целое число). Их можно считать состоящими из  $\alpha$ -частиц ( $\alpha$ -частичные ядра). К их числу относятся ядра  ${}^8Be$ ,  ${}^{12}C$ ,  ${}^{16}O$ ,  ${}^{20}Ne$  и т. д. ( $n = 2, 3, 4, 5$ ). В таких ядрах аномально велика энергия  $\epsilon_{\text{св}}$ , необходимая для отщепления (отделения) нейтрона; при переходе к соседнему нечётному по нейтронам ядру она уменьшается на 10—15 МэВ. В то же время энергия отделения  $\alpha$ -частицы  $\epsilon_{\alpha}$  мала. Так, ядро  ${}^8Be$  не стабильно относительно распада на две  $\alpha$ -частицы, т. е.  $\epsilon_{\alpha} \leq 0$  (строго говоря, такое ядро не существует), в ядро  ${}^{12}C$  энергия  $\epsilon_{\alpha} = 7$  МэВ, в  ${}^{16}O$   $\epsilon_{\alpha} = 16$  МэВ. В разл.

ядерных реакциях  $\alpha$ -частицы ядра «охотно» испускают  $\alpha$ -частицы. Среди возбуждённых состояний этих ядер есть состояния с аномально большими пиринами  $\alpha$ -переходов ( $\Gamma_n$ ), близкими к т. н. вигнеровскому пределу; последний означает, что  $\alpha$ -частицы на поверхности ядра существуют как «готовые». Перечисленные факты объясняются Н. а. м.

В Н. а. м. волновая  $\Phi$ -ция ядра  $\alpha$  с массовым числом  $A = 4n$  представляется в виде антисимметризов. произведения  $n$  волновых  $\Phi$ -ций  $\Phi_{\alpha_i}$ , описывающих внутр. движение нуклонов в отд.  $\alpha$ -кластере, на волновую  $\chi$ -цию, описывающую движение кластеров друг относительно друга. Напр., волновую  $\Phi$ -цию ядра  ${}^8\text{Be}$  в Н. а. м. можно было бы записать в виде

$$\psi({}^8\text{Be}) = \hat{A} \psi_{\alpha 1}(r_1) \psi_{\alpha 2}(r_2) \chi_L(R_1 - R_2), \quad (*)$$

где  $R_i = \sum_{j=1}^4 r_{ij} / 4$  — радиус-вектор, определяющий положение центра тяжести  $\alpha$ -кластера,  $L$  — полный орбитальный момент ядра,  $\hat{A}$  — оператор антисимметризации по нуклонам, относящимся к разным кластерам. При замене оператора  $\hat{A}$  на  $1$  Н. а. м. переходит в простую  $\alpha$ -кластерную модель. При этом игнорируется внутр. структура  $\alpha$ -кластеров иписание  $\alpha$ -частичного ядра сводится к задаче совокупности  $n$   $\alpha$ -частиц с потенциалом взаимодействия  $V_{\alpha}(\mathbf{r})$ ,  $n$ -ый подбирается по фазам  $\alpha$ -рассеяния. Такое приближение применимо для «рыхлых» систем, как, напр., ядро  ${}^8\text{Be}$ , но не годится для более плотных ядер, как, напр.,  ${}^{16}\text{O}$ . В случае ядра  ${}^{12}\text{C}$  волновая  $\Phi$ -ция  $\chi$  подчиняется Шрёдингера уравнению для системы трёх  $\alpha$ -частиц.

В случае большего числа кластеров не существует простых точных методов решения ур-ния Шрёдингера. Чаще всего их находят, предлагая заданную конфигурацию для центров тяжести  $\alpha$ -кластеров, напр. равносторонний треугольник или цепочка (для 3-кластерного ядра  ${}^{12}\text{C}$ ), правильный тетраэдр (для 4-кластерного ядра  ${}^{16}\text{O}$ ). Параметры, определяющие данную конфигурацию, находятся минимизирующей  $\alpha$ -кластерного гамма-функции.

Н. а. м. используется для описания ядерных реакций. Наиб. общим подходом здесь является т. н. метод резонирующих групп, в к-ром для описания рассеяния нуклонов на ядрах применяется волновая  $\Phi$ -ция т. н. (\*), а для описания реакций передачи одного или неск. нуклонов ядру — её обобщения. Упрощённые варианты Н. а. м. используются в теории  $\alpha$ -распада, а также для описания  $f$ -радиоактивности — спонтанного распада тяжёлых ядер с испусканием тяжёлых фрагментов (напр., ядро  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}$ , см. Радиоактивность).

Метод, близкий к Н. а. м., — двуэлектронная модель оболочек — используется для описания т. н. молекулярных состояний ядер (ядерных молекул). Такие состояния были обнаружены в лёгких ядрах. Напр., нек-рые состояния ядра  ${}^{24}\text{Mg}$  интерпретируются как «молекула», состоящая из двух ядер  ${}^{12}\text{C}$ , находящихся на нек-ром расстоянии друг от друга. Ядерные молекулы описываются волновой  $\Phi$ -цией вида (\*) с заменой  $\Phi_{\alpha}$  на  $\Phi_{\alpha\alpha}$ .

Получили распространение модели, исходящие из кваркового строения нуклона. В них нуклон рассматривается как 3-кварковый кластер и предпологается также существование мультикварковых конфигураций: 6- и 9-кварковых кластеров.

Представления Н. а. м. оказались полезными и для описания процесса фрагментации нуклонов в ядерных реакциях под воздействием тяжёлых ионов высоких энергий. В этих ядерных реакциях образуется составная ядерная система в виде нагретого и сжатого сгустка ядерного вещества ( $\Phi$  и  $\beta$  в о л о д),  $n$ -ый, остывая, расширяется до плотности, примерно в 10 раз меньшей нормальной ядерной плотности. Ожидается, что при такой плотности увеличивается вероятность образования

разл. кластеров, к-рые и испускаются в процессе распада составной системы.

Лит.: В и л д е р м у т К., Т а н Я., Единая теория ядра, пер. с англ., М., 1980.

**НУЛЕВАЯ ЭНЕРГИЯ** — разность между энергией осн. состояния квантомеханич. системы (напр., молекулы) и энергией, соответствующей минимуму потенц. энергии системы. Существование Н. э. является следствием *неопределённости соотношения*. В классич. механике частица может находиться в точке, отвечающей минимуму потенц. энергии, обладая одновременно равной нулю кинетич. энергией. В этом случае частица находится в состоянии устойчивого равновесия и имеет мин. энергию, равную потенц. энергии в точке равновесия. Вследствие квантомеханич. соотношения неопределённости для координаты ( $x$ ) и импульса ( $p$ ):  $\Delta p \Delta x \sim \hbar$ , локализация частицы ( $\Delta x \rightarrow 0$ ) вблизи минимума потенциала приводит к большому значению ср. кинетич. энергии частицы из-за большого разброса в значениях импульса ( $\Delta p \sim \hbar/\Delta x$ ). С другой стороны, уменьшение степени локализации частицы ( $\Delta x \neq 0$ ) приводит к увеличению ср. потенц. энергии, т. к. частица значит. время находится в области пространства, где потенциал превышает мин. значение. Энергия основного состояния соответствует наим. возможной энергии квантомеханич. системы, совместимой с соотношением неопределённости. Для одностороннего осциллятора, напр., Н. э. составляет  $\hbar\omega/2$ , где  $\omega$  — частота колебаний осциллятора. Н. э. молекул проявляется в реакциях изотопного обмена молекул, обладающих разл. Н. э., напр.  $D_2 + H_2 \rightleftharpoons DH + DH$ .

Наличие Н. э. — общее свойство квантомеханич. систем, обладающих *нулевыми колебаниями*.

С. С. Герштейн.

**НУЛЕВОЙ ЗВУК** — слабозатухающие колебания, распространяющиеся при низких темп-рах в системе вырожденных фермионов (*ферми-жидкость*, *ферми-газ*), причём длина свободного пробега квазичастиц много больше длины волны. Н. з. представляет собой проявление колебаний функции распределения квазичастиц. В этом его отличие от обычного звука, при распространении к-рого  $\Phi$ -ция распределения в каждом элементе объёма остаётся равновесной, а колеблется плотность жидкости и скорость движения элемента объёма как целого.

Наиб. яркий пример Н. з. — т. н. *продольный* Н. з. в жидком  ${}^3\text{He}$  при низких темп-рах  $T$ . В низких частотах ( $\omega \ll 1/\tau$ , что отвечает условию малости длины пробега  $l = \tau v$  квазичастицы по сравнению с длиной волны  $\lambda = 2\pi c/\omega$ , где  $c$  — скорость распространения НЧ гидродинамич. звука) в жидком  ${}^3\text{He}$ , как и в любой жидкости, могут распространяться обычные гидродинамич. (звуковые) колебания плотности ( $\tau$  — характерное время столкновительной релаксации). При  $\omega \sim 1/\tau$  ( $l \sim \lambda$ ) эти колебания, как всегда, испытывают очень большое затухание; на ещё более высоких частотах, если бы жидкий  ${}^3\text{He}$  являлся обычной классич. жидкостью, распространение в нём коллективных колебаний было бы невозможно. Однако в жидком  ${}^3\text{He}$  при  $\omega \gg 1/\tau$  опять возникает возможность распространения колебаний плотности со скоростью  $v_0$ , существенно превышающей  $c$ . Такие ВЧ-колебания имеют негидродинамич. природу и связаны со специфич. характерной энергетикой распределения частиц и их взаимодействием в ферми-жидкости  ${}^3\text{He}$ . В ферми-жидкости  ${}^3\text{He}$  при низких темп-рах ( $T \rightarrow 0$ ) частицы заполняют все возможные энергетич. состояния внутри определённой (ферми-) сферы в *импульсном пространстве* (см. Ферми-энергия, Ферми-поверхность), а состояния вне этой сферы свободны. Нарушение равновесного распределения квазичастиц может состоять в колебаниях ферми-поверхности, при к-рых роль возвращающей силы играет специфич. ферми-жидкостное взаимодействие квазичастиц. Колебания ферми-сферы приводит к распространению нуль-звуковых колебаний плотности в

№е. Поскольку время релаксации  $\tau$  квазицистич ферми-жидкости  $\tau \sim 1/T$ , то при  $T \rightarrow 0$  гидродинамич. область  $\omega \ll 1$  практически исчезает и любые колебания, в т. ч. плотности (звук), оказываются высокочастотными ( $\omega \gg 1/\tau$ ) нуль-звуковыми (отсюда и название: Н. з. — звук, распространяющийся в ферми-жидкости при нулевой температуре). В ДВ-пределе частота колебаний нулевого звука пропорциональна их волновому вектору.

Обычно при описании свойств вязотропной ферми-жидкости ферми-жидкостное  $\psi$ -число Ландау  $\psi$ , характеризующую ферми-жидкостное взаимодействие квазицистич близки ферми-поверхности, разлагают в ряд по полиномам Лежандра (как правило, соответствующие коэф. разложения обозначают  $F_n$  или  $F_n^{(0)}$ ), а отклонение  $\psi$ -функции распределения от равновесия — по присоединённым полиномам Лежандра  $P_n^m$ . При этом квантит. ур-ние, определяющее распространение Н. з., распадается на систему независимых ур-ний, каждое из к-рых описывает волны нуль-звукового типа с разл. азимутальными числами  $m$ . В пренебрежении столкновениями, т. е. при  $T \rightarrow 0$ , эти ур-ния сводятся к следующему транспарентным ур-ниям, задающим неиню скорости распространения  $s_m$  волн Н. з. с данным значением азимутального числа  $m$ :

$$\text{Det } a^{(m)}_{nk} = 0; \quad a^{(m)}_{nk} = \delta_{nk} + F_n \frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!} \times \times \int P_n^{(0)}(\theta) P_n^m(\theta) \frac{\cos \theta d\Omega / 4\pi}{\cos \theta - s_m / v_F}; \quad n, k \gg m,$$

где  $v_F$  — фермиевская скорость,  $\theta$  — направляющий угол, а интегрирование ведётся по всему телесному углу  $\Omega$ .

Волны Н.з. могут распространяться не в любых азимутальных числах  $m$ . Слабозатухающему Н. з. соответствуют только те решения  $s_m$  ур-ний (\*), для к-рых  $s_m > v_F$ , в противном случае волна испытывала бы сильное беспотенциальное затухание и распространяться не могла [это связано с обращением в нуль знаменателя подынтегрального выражения в (1); см. Ландау затухание]. Требование  $s_m > v_F$  накладывает, согласно (\*), существенные ограничения на ферми-жидкостные гармоники  $F_n$  с  $n \geq m$ . Как правило, параметры  $F_n$  довольно быстро убывают с ростом  $n$ , что приводит к невозможности распространения колебаний Н. з. с большими значениями азимутального числа  $m$ . Так, в слабонепрочном разреженном ферми-газе не могут распространяться волны Н. з. с  $m \neq 0$ . При  $T \neq 0$  условием отсутствия сильного беспотенциального затухания является неравенство  $(s_m / v_F - 1) \gg T / T_F$ , где  $T_F$  — *выходящая температура*.

Если ферми-жидкостная  $\psi$ -функция константа, т. е. только нулевая гармоника  $F_0 \neq 0$ , а все  $F_n = 0$  при  $n > 0$ , то в такой ферми-жидкости, согласно (\*), может распространяться только Н. з. с азимутальным числом  $m = 0$  (т. е. продольный Н. з.) со скоростью  $s_0$ , задаваемой ур-нием

$$\varphi(s_0 / v_F) = 1 / F_0, \quad \text{где } \varphi(x) = (x/2) \ln[(x+1)/(x-1)] - 1.$$

Причём ур-ние имеет решение только при  $F_0 > 0$ . Это и есть условие распространения продольного Н. з. в данной системе. Если, кроме  $F_0$ , отлична от нуля также гармоника  $F_1$ , то в такой системе может распространяться и Н. з. с азимутальным числом  $m = 1$  (т. н. поперечный Н. з.). Скорость поперечного Н. з.  $s_1$  задаётся ур-нием  $(s_1 / v_F - 1) \varphi(s_1 / v_F) = (1/2 - 2 / F_1)$ , имеющим действит. решение  $s_1 > v_F$  только при  $F_1 > 6$ . Поперечный Н.з. — аналог поперечных звуковых колебаний, к-рые, однако, в обычной жидкости быстро затухают и распространяться не могут.

Коэф. поглощения Н. з.  $\gamma$  при  $(s/v_F - 1) \gg T / T_F$  определяется столкновениями квазицистич друг с другом. При не слишком высоких частотах  $\gamma \sim T^2$  и не зависит

от частоты. На частотах  $\hbar\omega \geq kT$  для затухания Н. з. определяющими становятся столкновения квазицистич, сопровождающиеся поглощением или излучением кванта Н. з.; при этом  $\gamma$  пропорционально  $\omega^2$  и не зависит от темп-ры.

Иногда под Н. з. понимают также и ВЧ-колебания ( $\omega \gg 1$ ) произвольных спиновых компонент одночастичного распределения квазицистич. Так, для ферми-жидкости частиц со спином  $1/2$  рассматривают нуль-звуковые колебания антисимметрированной по спину  $\psi$ -функции распределения, т. е. импульсного распределения магн. момента квазицистич. Такие колебания представляют собой специфич. ферми-жидкостные *спиновые волны*, а скорость распространения этих нуль-звуковых спиновых волн и отсутствие магн. поля (спиновой поляризации) по-прежнему задаётся ур-ниями (\*), куда, однако, вместо гармоник  $F_n$   $f$ -функции Ландау, симметризованной по спину, следует подставить гармоники антисимметризованной по спину ферми-жидкостной  $\psi$ -функции, обозначаемые обычно  $Z_n$  или  $F_n^*$ .

Существование Н. з. в соответствующих спиновых волн предсказано Л. Д. Ландау в 1957, экспериментально продольный Н. з. обнаружен в жидком гелии  $^3\text{He}$  амер. физиками (1966).

По-видимому, в жидком  $^3\text{He}$  при повышенных давлениях может распространяться и поперечный Н. з. В электронной ферми-жидкости, напр. в металлах, распространение Н. з. обычно не наблюдается вследствие требования азотровнеустойчивости. Однако в нек-рых металлах в магн. поле наблюдались спиновые волны нуль-звукового типа.

Лит.: Ландау Л. Д., Колебания ферми-жидкости, «ЖЭТФ», 1957, т. 32, с. 59; Абель В. Р., Андерсон А. К., Уэйт Д. И., К., Распространение нулевого звука в жидком  $^3\text{He}$  при низких температурах, пер. с англ., «УФН», 1967, т. 31, с. 311; Хадатиков И. М., Теория сверхтекучести, М., 1971; P. I. Tzala P. M., Wolf P. A., Waves and interactions in solid state plasmas, «Solid State Phys.», [Suppl.] 13, 1973, ch. 10; Ли Фан Чи Е. М., Ли Ча Ески Я. П., Статистическая физика, ч. 2, М., 1978.

**НУЛЕВЫЕ КОЛЕБАНИЯ** — флуктуации квантовой системы (обычно квантового поля) в основном (вакуумном) состоянии. Н. к. возникают вследствие соотношения неопределённости и не имеют классич. аналога. Они обладают энергией  $\epsilon_0$  — *нулевой энергией*.

При квантовании свободного бозонного поля каждой моде с волновым вектором  $\mathbf{k}$  и частотой  $\omega(\mathbf{k})$  отвечает *осциллятор*, уровни энергии к-рого

$$\epsilon_{n\mathbf{k}} = \hbar\omega(\mathbf{k}) \left( n_{\mathbf{k}} + \frac{1}{2} \right); \quad n_{\mathbf{k}} = 0, 1, 2, \dots,$$

$n_{\mathbf{k}}$  — числа квантов поля с импульсом  $\hbar\mathbf{k}$  и энергией  $\hbar\omega(\mathbf{k})$ . В основном состоянии квантов нет ( $n_{\mathbf{k}} = 0$ ), но энергия отлична от нуля и равна  $1/2 \hbar\omega(\mathbf{k})$ . Полная энергия Н. к. получается суммированием по всем модам:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{2} \hbar \sum_{\mathbf{k}} \omega(\mathbf{k});$$

она расходится (*ультрафиолетовая расходимость*). При квантовании свободного фермионного поля возникает похожая расходившаяся сумма, но противоположного знака — это энергия заполненного «моря Дирака» (см. *Дирак теория Дирака*). Если числа бозонных и фермионных степеней свободы совпадают, расходимости в нулевой (вакуумной) энергии становятся менее сильными, а в суперсимметричной теории (см. *Суперсимметрия*)  $\epsilon_0 = 0$ . Это важно при учёте гравитации, универсально взаимодействующей с любой формой энергии, в т. ч. и в вакуумной, к-рая проявляется в ур-ниях Эйнштейна в форме космологич. постоянной ( $\Lambda$ -члена). Согласно наблюдат. данным,  $\Lambda$ -член близок к нулю с большой точностью, поэтому в теориях должен существовать механизм завуливания энергии вакуума. Очень возможно, что введение суперсимметрии — шаг в этом направлении.

Без учёта гравитации расходимости в  $\epsilon_0$  могут быть устранены соответствующим переопределением начальной отсчёта энергии, однако в нек-рых случаях могут оставаться нетривиальные конечные части, как в случае т. э. эффекта Казимира (Н. Casimir, 1948), когда поле квантуется в пространстве с границей. В этом случае частота  $\omega(k)$  зависит от параметров пространства. В результате  $\epsilon_0$  начинает зависеть от этих параметров. В простейшем случае одно из измерений предполагается ограниченным (размером  $L$ ), и параметром, от которого зависит вакуумная энергия, является длина  $L$ . Такая ситуация реализуется, напр., при квантовании эл.-магн. поля между бесконечными параллельными проводящими пластинами (в этом случае  $L$  — расстояние между пластинами). Теоретич. вычисление конечной части вакуумной энергии приводит к величине

$$\epsilon_k = -\frac{i}{30 \cdot 4\pi} \frac{\pi^3}{L^3}$$

к-рая блестяще совпадает с результатами эксперимента по измерению силы притяжения двух проводящих пластин в вакууме. Тем самым эффект Казимира делает Н. к. наблюдаемым.

Лит.: Вёркерен Д.ж. Д., Дрелл С. Д., Релятивистская квантовая теория, пер. с англ., т. 2, М., 1978; Виррелл Н., Девис Р., Квантование поля в искривлённом пространстве — времени, пер. с англ., М., 1984; Иткинсон К., Зюбер Ж.-Б., Квантовая теория поля, пер. с англ., т. 1, М., 1984. Я. И. Коен.

**НУЛЕВЫЕ КОЛЕБАНИЯ** в твёрдом теле — квантовохимич. движение частиц твёрдого тела при  $T = 0$  К. При классич. описании динамики твёрдого тела в основном состоянии ( $T = 0$  К) все частицы (атомы, ионы), из к-рых оно состоит, покоятся в точках, соответствующих устойчивому равновесию. В кристалле это точно локализованные атомы на узлах кристаллич. решётки (в минимумах потенциальной энергии). При квантовохимич. описании финитному движению частицы в потенц. яме отвечают дискретные уровни энергии. Напр., при движении частицы в одномерной потенц. яме  $U(x)$  это  $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \dots$  (рис.). Приём основное состояние определяется энергией  $\epsilon_0$ , расположенной выше  $0$ . Частота Н. к. равна  $\epsilon_0/h$ , амплитуда определяется областью локализации — расстоянием  $x = AB$ .

В большинстве случаев движение атомов в кристалле можно рассматривать как совокупность независимых гармонич. колебаний (мод) с разными частотами  $\omega_i$ . В квантовой теории каждой моде соответствует осциллятор, уровни энергии к-рого  $\epsilon_i = h\omega_i(n_i + 1/2)$ . Здесь индекс  $i$  изумерет разл. моды,  $n_i$  — целые числа — номера возбуждённых состояний осцилляторов. При этом энергия Н. к. для каждой моды соответствует значению  $n_i = 0$ , а суммарная энергия Н. к. системы  $\epsilon = \sum_i h\omega_i/2$ .

Влияние Н. к. на свойства системы при низких темп.-рах особенно существенно, когда амплитуда Н. к. велика. Так, для  $N$  амплитуда Н. к. сравнима с расстоянием между частицами, что определяет отсутствие кристаллизации (при нормальном давлении) даже при  $T = 0$  К (см. Гелий жидкий, Квантовая жидкость) и особенность кристаллич. фазы при высоких давлениях (см. Гелий твёрдый, Квантовая кристалл). Для атомов полноразованного по спинам атомарного водорода большая амплитуда Н. к. приводит, по-видимому, к возможности существования газовой фазы при  $T = 0$  К (см. Квантовый газ).

Н. к. влияют на значение параметра порядка системы в основном состоянии и иногда полностью опреде-

ляют структуру дальнего порядка в низкотемпературных фазах (см. Дальний и ближний порядок). Для низкотемпературных систем, особенно для одномерных, Н. к. могут вообще разрушить дальний порядок при низких темп.-рах (см. Квазидомерные соединения). При конечных темп.-рах роль Н. к. определяется из сравнения амплитуды Н. к. с амплитудой тепловых колебаний в системе.

Лит. см. при ст. Динамика кристаллической решётки. А. Э. Мейероуч.

**НУЛЬ-ЗАРЯД** в квантовой теории поля — принятое (жаргонное) название для свойства обращения в нуль фактора перенормировки константы связи  $Z = g_0/g_0$ , где  $g_0$  — затравочная константа связи на лагранжева взаимодействия,  $g_0$  — физ. константа связи, «одетая» взаимодействием. Равенство  $Z = 0$  формально приводит к тому, что при любом конечном значении  $g_0$  физ. константа связи  $g_0$  обращается в нуль. Если же (как это принято в совр. формулировке теории перенормировок) фиксировать  $g_0$  и выразить через неё *Грина функции*, то оказывается, что *эффективный заряд*  $g(k^2, g_0)$  обладает нефиз. полюсом (наз. также полюсом Ландау) по переменной квадрата 4-импульса ( $k^2$ ). Т.о., свойство Н.-з. свидетельствует о внутр. противоречии данной квантовополевой модели или о неприменимости теории возмущений близной этой модели.

Лит.: Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Квантовая теория, 2 изд., М., 1990. В. Д. Ширков.

**НУССЕЛЬТА ЧИСЛО** — безразмерный коэф. стационарного теплообмена между поверхностью тела и потоком жидкости или газа в случае естественной или вынужденной конвекции. Предполагается, что передача теплоты осуществляется теплопроводностью в тонком пограничном слое жидкости или газа, образуемом на поверхности тела. Н. ч.  $Nu = a/l$ , где  $a$  — коэф. теплоотдачи от поверхности тела к жидкости или газу (или наоборот),  $l$  — характерный размер тела,  $\lambda$  — коэф. теплопроводности жидкости или газа. Иногда вводят также местное Н. ч.  $Nu_x = \alpha(x)l/\lambda$ , где  $x$  — координата рассматриваемой точки тела. Назв. по имени В. Нуссельта (Е. К. W. Nußelt).

В задачах теплообмена Н. ч. обычно является искомым величиной для тела заданной формы и выражается в общем случае в виде зависимости от *подобия критериев*:  $Nu = f(Pr, Gr, Re, M, \gamma)$ , где  $Pr$  — *Прандтля число*,  $Gr$  — *Грасшофа число*,  $Re$  — *Рейнольдса число*,  $M$  — *Маха число*,  $\gamma = c_p/c_v$  — отношение ул. теплёмкостей газа при постоянных давлении и объёме соответственно.

В случае естеств. конвекции обычно используются эмпирич. ф-лы вида  $Nu = C_1 Gr^m Pr^n$ , а в случае вынужденной конвекции вида  $Nu = C_2 Re^m Pr^n$ , где постоянные  $C_1$  и  $C_2$  и показатели степеней  $m_1, n_1, m_2, n_2$  подбирают путём обобщения эксперим. данных, а числа  $M$  и  $\gamma$  — известные параметры для этих аналогий. Зависимости указанного вида получены гл. обр. для тел простой формы (ламинарное и турбулентное обтекание пластин, сферы, течения в трубах и т. п.).

В случае массообмена в смеси реал. газон вводится д.и.ф.ф.у.и.о.и.о.е. Н. ч.  $Nu_D = \beta_1/D$  или  $Nu_D = \beta_2 Pr^{1/3} D$ , где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — коэф. массотдачи для данного компонента смеси, отнесённые соответственно к разности массовых долей ( $\beta_1$ ) и разности парциальных давлений ( $\beta_2$ ).  $R$  — газовая постоянная,  $D$  — коэф. диффузии для рассматриваемого компонента смеси,  $T$  — абс. темп.-ра.  $Nu_D$  иногда наз. также и с л о м Ш е р в у д а.

С. Л. Вишневецкий.

**НУТАЦИЯ** (от лат. nutatio — колебание) — движение твёрдого тела, имеющего неподвижную точку, к-рое происходит одновременно с вращением и прецессией тела и определяется изменением угла нутации  $\theta$  (см. Эйлеры углы). У гироскопа (волчка), движущегося под действием силы тяжести  $P$ , Н. представляет собой колебания оси вращ. гироскопа, амплитуда и период к-рых тем меньше, чем больше угл. скорость

объект. вращения  $\Omega$ . При больших  $\Omega$  угловая амплитуда  $\theta_1 - \theta_0$  и период  $T$  приближенно равны:

$$\theta_1 - \theta_0 \approx \frac{2\rho a \sin \theta_0}{C \sin \alpha}, \quad T \approx \frac{2\pi a}{C \omega}$$

где  $\theta_0$  и  $\theta_1$  — пределы изменения угла  $\theta$ ,  $a$  — расстояние от неподвижной точки до центра тяжести,  $C$  — момент инерции гироскопа относительно его оси симметрии,  $A$  — момент инерции относительно оси, перпендикулярной к оси симметрии и проходящей через неподвижную точку. Частота  $\nu = 1/T$  при больших  $\Omega$  может быть столь велика, что щупа, колебания оси вольчка будут восприниматься на слух (жуужжание).

Под  $N$ . гироскопич. система (механич. система, содержащая гироскопы) понимают то периодич. изменение углов, определяющих положение системы, к-рое происходит с малыми амплитудами и большими частотами. Из-за наличия сопротивлений (трения) щупа, колебания довольно быстро затухают, после чего гироскоп (или гироскопич. система) совершает чисто прецессионное движение. См. также *Прецессия*. С. М. Тарс.

**НЬЮТОН (Н. N)** — единица силы в СИ. Названа в честь И. Ньютона (I. Newton). 1 Н — сила, сообщаящая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с<sup>2</sup> в направлении действия силы. 1 Н = 10<sup>5</sup> дин = 0,102 кгс.

**НЬЮТОНА ЗАКОН ТРЕНИЯ** в гидромеханике — эмпирич. ф-ла, выражающая пропорциональность напряжения трения между двумя слоями прямолинейно движущейся вязкой жидкости относительно скорости скольжения этих слоев, т. е. отношению  $\tau$  к единице длины изменению скорости по нормали к направлению движения. Предложен И. Ньютоном в 1687. В соответствии с этим законом напряжение трения  $\tau$ , действующее на поверхности элементарного объема жидкости или газа, пропорц. градиенту скорости  $du/dy$ , где  $u$  — составляющая скорости жидкости вдоль поверхности, а  $y$  — координата, нормальная поверхности:

$$\tau = \eta(du/dy). \quad (1)$$

Коэф. пропорциональности  $\eta$  наз. коэф. внутр. трения жидкости или динамич. коэф. вязкости (иногда просто *вязкостью*).

Перевос теплоты теплопроводностью в жидкости (газе) обусловлен теми же молекулярными процессами, что и вязкость. Аналогичная закону (1) ф-ла

$$q = \lambda(\partial T/\partial n), \quad (2)$$

где  $q$  — кол-во теплота, проходящее через единицу площади поверхности в единицу времени,  $T$  — абс. температура,  $n$  — направление нормали к поверхности выделенного элементарного объема жидкости или газа, наз. ф-лой или законом Фурье. Коэф. пропорциональности в ф-ле (2) наз. коэф. теплопроводности  $\lambda$  (или просто *теплопроводностью*).

Ф-ла (1) выражает также пропорциональность касат. напряжения в жидкости (газе) величине скорости деформации элементарного объема жидкости в направлении скорости  $u$ . В случае произвольного движения жидкости или газа действующие на выделенный элементарный объем напряжения описываются тензором. Установлено, что тензор напряжений является линейной ф-цией тензора скоростей деформаций элементарного объема жидкости. Эту линейную зависимость иногда наз. обобщенным законом Ньютона. В частности, в плоскости, перпендикулярной оси  $y$ , касат. напряжение

$$\tau_{yx} = -\eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

где  $v$  — составляющая скорости в направлении  $x$ , а ось  $x$  направлена вдоль поверхности. Н. з. т. (1) справедлив лишь в случае, когда  $dv/dx \ll du/dy$ .

Жидкости (газы), подчиняющиеся Н. з. т., наз. *ньютоновскими* или *ньютоновскими жидкостями*, а все ос-

тальные для к-рых закон (1) не выполняется, — *аномальными* или *неньютоновскими жидкостями*.

Лит.: Праудлэнд Л., Гидравромеханика, пер. с нем., 2 изд., М., 1951; Лойцянский Л. Г., Механика жидкости и газа, 6 изд., М., 1987.

С. Л. Вышневецкой.

**НЬЮТОНА ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ** — см. *Всемирного тяготения закон*.

**НЬЮТОНА ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ** — три закона, лежащие в основе т. п. классич. механики. Сформулированы И. Ньютоном (1687) следующим образом: 1-й закон: «Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние». 2-й закон: «Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует». 3-й закон: «Действие всегда есть равное и противоположное противодействию, иначе, взаимодействия двух тел друг на друга между собою равны и направлены в противоположные стороны».

Согласно соввр. представлениям и терминологии, в 1-м и 2-м законах под телом следует понимать *материальную точку*, а под движением — движение относительно *инерциальной системы отсчета*. Матем. выражение 2-го закона в классич. механике имеет вид:  $d(mv)/dt = F$  или  $m\ddot{x} = F$ , где  $m$  — масса точки,  $v$  — ее скорость,  $\ddot{x}$  — ускорение,  $t$  — время,  $F$  — действующая сила.

Н. з. м. появились как результат обобщения многочисл. наблюдений, опытов и теоретич. исследований Г. Галилея (G. Galilei), Х. Гюйгенса (Ch. Huygens), самого Ньютона и др. Н. з. м. перестают быть справедливыми для движения объектов очень малых размеров, сравнимых с размерами атомов (напр., элементарные частицы), и при движениях со скоростями, близкими к скорости света; см. *Квантовая механика*, *Относительность теория*.

Лит.: Галилей Г., Беседы и математические доказательства к механике и местному движению, пер. с лат., т. 1, М., 1934; Ньютон И., Математические начала натуральной философии, пер. с лат., в кн.: Крылов А. Н., Собр. трудов, т. 7, М.—Л., 1936. См. также лит. при ст. *Динамика* и *Механика*. С. М. Тарс.

**НЬЮТОНА КОЛЬЦА** — интерференц. полосы равной толщины в форме колец, расположенных концентрически вокруг точки касания двух сферич. поверхностей либо плоскости и сферы. Впервые описаны в 1675 И. Ньютоном. *Интерференция света* происходит в тонком зазоре (обычно воздушном), разделяющем соприкасающиеся поверхности; этот зазор играет роль тонкой пленки (см. *Оптика тонких слоев*). Н. к. наблюдаются и в проходящем, и — более отчетливо — в отраженном свете. При освещении монохроматич. светом длин волн  $\lambda$  Н. к. представляют собой чередующиеся темные и светлые полосы (рис. 1). Светлые возникают в местах, где разность фаз между прямым и дважды отраженным лучом (в проходящем свете) или между лучами, отраженными от обеих соприкасающихся поверхностей (в отраженном свете), равна  $2m\lambda$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) (т. е. разность хода  $\Delta m$  равна четному числу полуволн). Темные кольца образуются там, где разность фаз равна  $(2l + 1)\lambda$ . Разность фаз лучей определяется толщиной зазора  $\delta_m$  с учетом изменения фазы световой волны при отражении (см. *Отражение света*). Так, при отражении от границы воздух — стекло фаза меняется на  $\pi$ , а при отражении от границы стекло — воздух фаза остается неизменной. Поэтому в случае двух стеклянных поверхностей (рис. 2), с учетом различий в условиях отражения от ниж. и верх. поверхностей зазора (потеря по-

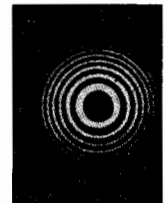


Рис. 1. Кольца Ньютона в отраженном свете.

дуводны),  $m$ -е тёмное кольцо образуется, если  $\Delta m = 2\delta_m + \lambda/2 = (2m + 1)\lambda/2$ , т. е. при толщине зазора  $\delta_m = m\lambda/2$ . Радиус  $r_m$   $m$ -го кольца определяется из треугольника  $A'O'C$ :  $r_m^2 = R^2 - (R - \delta_m)^2 \approx 2R\delta_m$ .

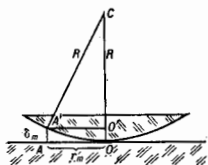


Рис. 2. Схема образования колец Ньютона.  $O$  — точка касания сферы радиуса  $R$  и плоской поверхности;  $\delta_m$  — толщина воздушного зазора в области образования кольца радиуса  $r_m$ .

Откуда  $r_m = \sqrt{2R\delta_m}$ , для тёмного  $m$ -го кольца  $r_m = \sqrt{Rm\lambda}$ . Это соотношение позволяет с хорошей точностью определять  $\lambda$  по измерениям  $r_m$ . Если  $\lambda$  известна, Н. К. можно использовать для измерения радиусов поверхностей линз и контроля правильности формы сферич. и плоских поверхностей. При освещении монохроматич. (напр., белым) светом Н. К. становятся цветными. Наиб. отчётливо Н. К. наблюдаются при малой толщине зазора (т. е. при использовании сферич. поверхностей больших радиусов).

Лит.: Швидковський А. А., Прикладная физическая оптика, М., 1961; Дитчер Р., Физическая оптика, пер. с англ., М., 1965. А. П. Гагарин. **НЬЮТОНСКАЯ ЖИДКОСТЬ** — вязкая жидкость, подчиняющаяся при своём течении закону вязкого трения Ньютона. Для прямолинейного ламинарного течения этот закон устанавливает наличие линейной зависимости между касат. напряжением  $\tau$  в плоскостях сопряжения слоёв жидкости и производной от скорости течения  $v$  по направлению нормали  $n$  к этим плоскостям, т. е.  $\tau = \eta dv/dn$ , где  $\eta$  — динамич. коэф. вязкости. В общем случае пространств. течения для Н. ж. имеет место линейная зависимость между тензорами напряжений  $\sigma_{ij}$  и скоростей деформаций  $\epsilon_{ij}$ . Свойства Н. ж. обладают большинство жидкостей (вода, смазочное масло и др.) и все газы. Течение Н. ж. изучается в *гидроаэромеханике* (см. *Ньютона закон трения*). Жидкости, для к-рых указанные выше зависимости не являются линейными, наз. *неньютоновскими жидкостями*. К ним относится ряд суспензий и растворов полимеров. Такие течения изучает *реология*.



**ОБЕДНЕННЫЙ СЛОЙ** — то же, что *запорный слой*. **ОБЕРТОН** (от нем. OberTon — высокий тон, высокий звук) — синусоидальная составляющая периодич. колебания сложной форм с частотой, более высокой, чем *основной тон*. Любое периодич. колебание можно представить как сумму осн. тона и  $O_n$ , причём частоты и амплитуды этих  $O_n$  определяются как физ. свойствами колебат. системы, так и способом её возбуждения. Если частоты всех  $O_n$  — целые кратные осн. частоте, то такие  $O_n$  наз. гармоническими или *гармониками*. Если же частоты зависят от осн. частоты более сложным образом, то говорят о негармонии  $O_n$ . В этом случае представление периодич. колебания в виде суммы гармоник будет приближённым, во тем более точным, чем большее число гармоник введено. Если частота осн. тона  $f$  (первая гармоника), то частота второй гармоники равна  $2f$  или близка к этому значению, частота третьей  $3f$  и т. д. Состав и кол-во  $O_n$  сложного звука определяет его

качества, окраску, или *тембр звука*. Анализ колебаний и выделение  $O_n$  относится не только к акустическим, но и к электр. колебаниям; в последнем случае их обычно наз. гармониками.

**ОБУЖЧЕННОСТЬ** — то же, что *энергетическая обесценность*.

**ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — специфич. взаимное влияние одинаковых (тождественных) частиц, эффективно проявляющееся как результат нек-рого осн. эффекта взаимодействия. О. в. — чисто квантовомеханич. эффект, не имеющий аналога в классич. физике (см. *Квантовая механика*).

Вследствие квантовомеханич. принципа неразличности одинаковых частиц (*тождественности принципа*) волновая ф-ция системы должна обладать определённой симметрией относительно перестановки двух таких частиц, т. е. их координат и проекций спинов: для частиц с целым спином — бозонов — волновая ф-ция системы не меняется при такой перестановке (является симметричной), а для частиц с полуцелым спином — фермионов — меняет знак (является антисимметричной). Если силы взаимодействия между частицами не зависят от их спинов, волновую ф-цию системы можно представить в виде произведения двух ф-ций, одна из к-рых зависит только от координат частиц, а другая — только от их спинов. В этом случае из принципа тождественности следует, что координатная часть волновой ф-ции, описывающая движение частиц в пространстве, должна обладать определённой симметрией относительно перестановки координат одинаковых частиц, зависящей от симметрии спиновой части волновой ф-ции. Наличие такой симметрии означает, что имеет место определённая согласованность, корреляция движения одинаковых частиц, к-рая сказывается на энергии системы (даже в отсутствие силовых взаимодействий между частицами). Поскольку обычно влияние частиц друг на друга является результатом действия между ними к.-д. сил, о взаимном влиянии одинаковых частиц, вытекающем из принципа тождественности, говорят как о проявлении специфич. взаимодействия. О. в.

Возникновение О. в. можно проиллюстрировать на примере атома гелия [впервые это было сделано В. Гейзенбергом (W. Heisenberg) в 1926]. Спиновые взаимодействия в лёгких атомах малы, поэтому волновая ф-ция двух электронов в атоме гелия может быть представлена в виде

$$\Psi = \Phi(r_1, r_2)\chi(s_1, s_2), \quad (1)$$

где  $\Phi(r_1, r_2)$  — ф-ция координат электронов,  $\chi(s_1, s_2)$  — ф-ция проекций их спинов на нек-рое направление. Т. к. электроны являются фермионами, полная волновая ф-ция должна быть антисимметричной. Если суммарный спин  $S$  обоих электронов равен нулю (спины антипараллельны — параллели), то спиновая ф-ция  $\chi$  антисимметрична относительно перестановки спиновых переменных и, следовательно, координатная ф-ция  $\Phi$  должна быть симметрична относительно перестановки координат электронов. Если же  $S = 1$  (спины параллельны — ортогоналы), то  $\chi$  симметрична, а  $\Phi$  антисимметрична. Обозначая через  $\Psi_n(r_1)$ ,  $\Psi_m(r_2)$  волновые ф-ции отд. электронов в атоме гелия (индексы  $n, m$  означают набор квантовых чисел, определяющих состояние электрона в атоме), можно, пренебрегая сначала взаимодействием между электронами, записать координатную часть волновой ф-ции в виде

$$\Phi_a = \frac{1}{\sqrt{2}} [\Psi_n(r_1)\Psi_m(r_2) - \Psi_m(r_1)\Psi_n(r_2)] \text{ для } S = 1, \quad (2)$$

$$\Phi_c = \frac{1}{\sqrt{2}} [\Psi_n(r_1)\Psi_m(r_2) + \Psi_m(r_1)\Psi_n(r_2)] \text{ для } S = 0$$

(множитель  $1/\sqrt{2}$  введён для нормировки волновой ф-ции). В состоянии с антисимметричной координатной ф-цией  $\Phi_a$  ср. расстояние между электронами оказывается большим, чем в состоянии с симметричной



ф-цией  $\Phi_0$ ; это видно из того, что вероятность  $|\Psi|^2 = |\Phi_0|^2 |\chi_c|^2$  нахождения электронов в одной и той же точке ( $r_1 = r_2$ ) в состоянии  $\Phi_0$  равна нулю. Поэтому ср. энергия кулоновского взаимодействия (отталкивания) двух электронов оказывается в состоянии  $\Phi_0$  меньшей, чем в состоянии  $\Phi_1$ . Поправка к энергии системы, связанная с взаимодействием электронов, определяется по теории возмущений:

$$E_{02} = K \pm A, \quad (3)$$

где знаки  $\pm$  относятся соответственно к симметричному и антисимметричному координатным состояниям,

$$K = e^2 \int \frac{|\Psi_0(r_1)|^2 |\Psi_0(r_2)|^2}{|r_1 - r_2|} d\tau_1 d\tau_2, \quad (4)$$

$$A = e^2 \int \frac{\Psi_0^*(r_1) \Psi_0(r_2) \Psi_1(r_1) \Psi_1(r_2)}{|r_1 - r_2|} d\tau_1 d\tau_2$$

( $e$  — заряд электрона,  $d\tau = dx dy dz$  — элемент объёма). Величина  $K$  имеет наглядный классич. смысл и соответствует электростатич. взаимодействию двух заряд. «облаков» с плотностями заряда  $e|\Psi_0(r_1)|^2$  и  $e|\Psi_0(r_2)|^2$ . Величину  $A$ , вводимую обменным интегралом, можно интерпретировать как электростатич. взаимодействие заряд. «облаков» с плотностями заряда  $e\Psi_0^*(r_1)\Psi_1(r_1)$  и  $e\Psi_1^*(r_2)\Psi_0(r_2)$  (звёздочка означает комплексное сопряжение), т. е. когда каждый из электронов находится одновременно в состояниях  $\Psi_0$  и  $\Psi_1$  (это бессмысленно с точки зрения классич. физики). Из (3) следует, что полная энергия пара- и ортогоналы с электронами в аналогичных состояниях отличается на величину  $2A$ . Т. о., хотя непосредственно спиновое взаимодействие мало и не учитывается, тождественность двух электронов в атоме гелия приводит к тому, что энергия системы оказывается зависящей от полного спина системы, как если бы между частицами существовало дополнительное, обменное взаимодействие. Очевидно, что  $O. v.$  в данном случае является частью кулоновского взаимодействия электронов и иным образом выступает при приближённом рассмотрении квантомеханич. системы, когда волновая ф-ция всей системы выражается через волновые ф-ции отд. частиц (в частности, в приближении Хартри — Фока; см. Хартри — Фока метод).

$O. v.$  эффективно проявляется в тех случаях, когда «перекрываются» волновые ф-ции отд. частиц системы, т. е. когда существуют области пространства, в к-рых с заметной вероятностью может находиться частица в разл. состояниях движения. Это видно из выражения для обменного интеграла  $A$ : если степень перекрытия состояний  $\Psi_0^*(r)$  и  $\Psi_1(r)$  незначительна, то величина  $A$  очень мала.

Из принципа тождественности следует, что  $O. v.$  возникает в системе одинаковых частиц даже в случае, если прямыми силовыми взаимодействиями частиц можно пренебречь, т. е. в идеальном газе тождества частиц. Эффективно оно начинает проявляться, когда ср. расстояние  $d$  между частицами становится сравнимым (или меньшим) с длиной волны де Бройля  $\lambda$ , соответствующей ср. скорости частиц. Поскольку  $d = n^{-1/3}$  (где  $n$  — концентрации частиц), а  $\lambda = h/p \approx h/\sqrt{mkT}$  (где  $p \approx \sqrt{mkT}$  — ср. импульс,  $m$  — масса частиц,  $T$  — абс. темп-ра), условие  $\lambda \geq d$  даёт простой критерий «включения»  $O. v.$  в идеальном газе:  $kT \leq h^2 n^{2/3} / m$  (условие вырождения).

Характер  $O. v.$  различен для фермионов и для бозонов. Для фермионов  $O. v.$  является следствием Паули принципа, препятствующего сближению тождества частиц с одинаковым направлением спина, и эффективно проявляется как отталкивание их друг от друга на расстояниях  $d \leq \lambda$ ; отличие от нуля энергии вырожденного газа фермионов (ферми-газа) целиком обусловлено таким  $O. v.$  Для сильно сжатого вещества, когда

$d$  значительно меньше размеров атомов (но больше ядерных),  $O. v.$  электронов (отталкивание) обуславливает осн. вклад в давление при низких темп-рах, удовлетворяющих условию вырождения. Такие условия осуществляются в звёздах типа *белых карликов*.

В системе тождеств бозонов  $O. v.$ , напротив, имеет характер сильного притяжения частиц. Рассмотрение систем из большого числа одинаковых частиц производится на основе Ферми — Дирака статистики для фермионов и Бозе — Эйнштейна статистики для бозонов.

Если взаимодействующие тождества частицы находятся во внеш. поле, напр. в кулоновом поле ядра, то существование определённой симметрии волновой ф-ции и соответственно определённой корреляции движения частиц влияет на их энергию в этом поле, что также является обменным эффектом. Обычно (в атоме, молекуле, кристалле) это  $O. v.$  вносит вклад обратного знака по сравнению с вкладом  $O. v.$  частиц друг с другом. Поэтому суммарный обменный эффект может как понижать, так и повышать полную энергию взаимодействия в системе. Энергетич. выгода или невыгода состояния с параллельными спинами фермионов, в частности электронов, зависит от отн. величин этих вкладов. Так, в ферромагнетике (аналогично рассмотренному атому гелия) более низкой энергией обладает состояние, в к-ром спины (и магн. моменты) электронов в незаполненных оболочках соседних атомов параллельны; в этом случае благодаря  $O. v.$  возникает спонтанная намагниченность (см. Ферромагнетизм). Напротив, в молекулах с ковалентной хим. связью, напр. в молекуле  $H_2$ , энергетически выгодно состояние, в к-ром спины валентных электронов соединяющихся атомов антипараллельны.

$O. v.$  объясняет, т. о., закономерности атомной и молекулярной спектроскопии, хим. связь в молекулах, ферромагнетизм (и антиферромагнетизм), а также др. специфич. явления в системах одинаковых частиц.

Лит. см. при ст. Квантовая механика.

Л. А. Нурчица, С. С. Герштейн.

**ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** в магнетизме — специфический квантомеханич. связь между носителями магнетизма в атомных ядрах, атомах, молекулах, газах и конденсир. средах (*обменное взаимодействие, ковалентное обменное взаимодействие, РККИ-обменное взаимодействие*). Первопроходчик  $O. v.$  является принцип неразличимости тождеств частиц (*тождественности принцип*).  $O. v.$  по своему генезису имеет электростатич. происхождение. Как правило, энергия электр. взаимодействия микрочастиц больше (по порядку величины) энергии магн. взаимодействия. Это следует из сравнения квазиклассич. выражений для электр. энергии взаимодействия двух элементарных зарядов  $e \sim 10^{-10}$  СГСЭ (расположенных на атомном расстоянии  $a \sim 10^{-8}$  см), равной  $e^2/a \sim 10^{12}$  эрг, и энергии взаимодействия двух элементарных магн. моментов (магнетон Бора  $\mu_B \sim 10^{-20}$  СГСМ), равной  $\mu_B^2/a^3 \sim 10^{-10}$  эрг. В классич. физике все магн. свойства микро- и макро-систем определяются только магн. взаимодействиями микрочастиц. В те же время точки Кюри  $T_c$  магн. ферромагнетиков (т. е. темп-ра. выше к-рой ферромагнетизм исчезает) порядка  $10^2$  —  $10^3$  К, и следовательно, соответствующие этим темп-рам энергии  $kT \sim 10^{14}$  —  $10^{15}$  эрг, что в десятки или сотни раз больше любой возможной энергии связи магн. связи. Кроме того, опыты Я. Г. Дорфмана (1927) по определению отклонения  $\beta$ -частиц в спонтанно намагниченном ферромагнетике показали однозначно, что внутри ферромагнетика нет никакого эфф. поля магн. происхождения. Эти факты позволяли предположить, что такое яркое магн. явление, как ферромагнетизм, по своему происхождению в основном не является магн. эффектом, а обусловлено электр. силами связи атомных носителей магнетизма в твёрдом теле. Связь магн. состояния простейших двух-электронных микросистем с электр. взаимодействием электронов была показана на примере атома гелия В. Гейзенбергом (В. Heisen-

berg, 1926) и молекулы водорода В. Гайтлером и Ф. Лондоном (W. Heitler, F. W. London, 1927). Расчёт для этих систем проводился при полном пренебрежении магнитными (спин-спиновыми, спин-орбитальными и орбит-орбитальными) взаимодействиями. Тем не менее оказывается, что энергия системы резко зависит от её магн. состояния. В двухэлектронной спиновой системе для  $s$ -состояний, в  $k$ -рых отсутствуют орбитальные магн. вклады, возможны два типа состояний: синглетное с нулевым результирующим спином  $S = 0$  и триплетное с результирующим спином  $S = 1$ . Полуразница между энергиями этих состояний  ${}^0\mathcal{E}$  и  ${}^3\mathcal{E}$  есть энергия  $O$  в двухэлектронной системы, т. е.:

$$A = 1/2({}^0\mathcal{E} - {}^3\mathcal{E}). \quad (1)$$

Из (1) видно, что при  $A > 0$  имеем  ${}^3\mathcal{E} < {}^0\mathcal{E}$ , т. е. основным состоянием является триплетное намагнитченное состояние со спином  $S = 1$ . Напротив, при  $A < 0$  имеем  ${}^0\mathcal{E} < {}^3\mathcal{E}$  и основным состоянием является немагнитный синглет. По П. Дираку (P. A. M. Dirac, 1926) и Дж. Ван Флеку (J. H. Van Vleck, 1932), энергию двухэлектронной системы можно записать в виде

$$\mathcal{E} = 1/2({}^0\mathcal{E} + {}^3\mathcal{E}) - 1/2\kappa({}^0\mathcal{E} - {}^3\mathcal{E}), \quad \kappa = \pm 1; \quad (2)$$

при  $\kappa = -1$   $\mathcal{E} = {}^0\mathcal{E}$ , а при  $\kappa = +1$   $\mathcal{E} = {}^3\mathcal{E}$ . Из квантовой механики известно, что квадрат оператора вектора суммарного спина двухэлектронной системы  $S = s_1 + s_2$ , в единицах  $\hbar^2$ , равен  $S^2 = 3/2 + 2s_1s_2 = S(S+1)$ . Здесь  $s_1, s_2$  спиновые моменты одного электрона со спиновыми квантовыми числами  $s = 1/2$ , поэтому  $s_1 = s_2 = -s(s+1) = 3/4$ . Оператор  $(1/2 + 2s_1s_2)$  имеет собств. значения  $S(S+1) = 1, 2$ , совпадающие с возможными значениями параметра  $\kappa$  из (2) при  $S = 0$  и  $S = 1$ . Поэтому оператор энергии (2) можно записать как:

$$\mathcal{H} = \mathcal{E}_0 - 2As_1s_2, \quad (3)$$

где  $\mathcal{H}$  имеет требуемые собств. ф-ции по отношению к спину и точные собств. значения энергии. Здесь  $\mathcal{E}_0 = 1/2({}^0\mathcal{E} + {}^3\mathcal{E})$  — ср. энергия всех 4 спиновых состояний (синглетное с  $S = 0$  и трёх триплетных с  $S = 1$  и  $S_z = 0, +1, -1$ ) с учётом их статист. весов. Вычисление обменного параметра  $A$  требует знания волновых ф-ций задачи. Из (3) мы только знаем, что при  $A > 0$  основное состояние триплетное (магнитное), а при  $A < 0$  оно синглетное (немагнитное). Дирак и Ван Флек обобщили гамилтониан (3) на случай кристалла. Приближённая ф-ла обобщённого гамилтониана имеет вид

$$\mathcal{H}_{об} = \mathcal{E}_0 - 2 \sum_{i < k} A_{ik} s_i s_k. \quad (4)$$

Здесь  $s_i$  — операторы векторов спинов отд. электронов со спиновыми квантовыми числами  $1/2$ . Возможны и др. гамилтонианы обмена для более сложных типов связи. Обычно ф-лу (4) применяют к случаям, когда под векторами  $s_i$  подразумевают полные спины незаполненных  $d$ - или  $f$ -слоёв электронной оболочки атомов  $S_a = \sum_i s_i$ :

$$\mathcal{H}_{об} = \mathcal{E}_0 - 2 \sum_{\alpha < \beta} A_{\alpha\beta} S_{\alpha} S_{\beta}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — номера узлов решётки. Законность перехода от (4) к (5) не столь очевидна и требует спец. исследования. Если считать, что обменный параметр заметно отличен от нуля только для узлов  $\alpha$  и  $\beta$  — ближайших соседей в решётке, то, вводя обозначение  $A = A_{\alpha\beta}$ , будем иметь вместо (5)

$$\mathcal{H}_{об} = \mathcal{E}_0 - 2A \sum_{\alpha < \beta} S_{\alpha} S_{\beta}, \quad (6)$$

где сумма берётся только по парам ближайших соседей.

Для квадрата суммарного спина всего кристалла снова, как и для двухэлектронной системы, имеем

$$\left( \sum_{\alpha=1}^N S_{\alpha} \right)^2 = \sum_{\alpha=1}^N S_{\alpha}^2 + \sum_{\alpha \neq \beta} S_{\alpha} S_{\beta} = NS(S+1) + \sum_{\alpha \neq \beta} S'_{\alpha} S'_{\beta} = S'(S'+1), \quad (7)$$

где  $S'$  — спиновые квантовые число всей системы  $N$  атомов. Число членов в двойной сумме в (7) равно  $N(N-1)$ , поэтому среднее от её отд. члена даётся выражением

$$\langle S_{\alpha} S_{\beta} \rangle = \frac{S'(S'+1) - NS(S+1)}{N(N-1)}. \quad (8)$$

Число членов в сумме (6) равно  $NZ/2$ , где  $Z$  — число ближайших соседей узла решётки. Поэтому ср. значение  $\mathcal{H}_{об}$  с точностью до аддитивной постоянной  $\mathcal{E}_0$  равно

$$\langle \mathcal{H}_{об} \rangle \approx - \frac{ZA}{N-1} [S'(S'+1) - NS(S+1)].$$

Результирующий спин  $S$  отд. узла решётки — порядки единицы, а число  $S'$  — порядка доли всех узлов кристалла, участвующих в намагниченности,  $k$ -рая равна  $m = N/y$  (здесь  $y = 1/N\mu_B$  — относительная намагниченность). Поэтому в ферромагнетиках с точностью до величин порядка  $N^{-1}$  имеем

$$\bar{\mathcal{H}}_{об} = \langle \mathcal{H}_{об} \rangle \approx - \frac{ZA}{N} m^2 = -NZAm^2. \quad (9)$$

Последнее эквивалентно выражению для энергии молекулярного поля в классич. феноменол. теории ферромагнетизма Вейса (P. Weiss, 1907). Однако квантовая теория даёт фн. интерпретацию электростатич. происхождения обменного параметра  $A$ , что не могло быть получено в классич. теории (см. *Молекулярное поле*). Используя даже очень грубое приближение обменной проблемы (приближение энергетич. центров тяжести по Гейзенбергу), получаем критерий для магн. состояния твёрдого тела:  $A > 0$  — это необходимое условие для возникновения ферромагнетизма, а  $A < 0$  — для немагн. состояния (антиферромагнетизма или парамагнетизма). Этот критерий, естественно, не может носить характера достаточного условия в силу приближённости теории энергетич. центров тяжести для локализов. атомых спиновых моментов в кристалле. Большие трудности возникают до сих пор как при попытках уточнения вида



Схема, иллюстрирующая связь четырех различных основных механизмов обмена в кристаллах с металлической (её преобладание указано вертикальной стрелкой, направленной вверх) и неметаллической (вертикальная стрелка, направленная вниз) связями для локализованных (горизонтальная стрелка, направленная влево) и не локализованных (горизонтальная стрелка, направленная вправо) моментов. Каждый тип обмена представляет двумя концентрическими окружностями; из них внутренняя окружность (сплошная линия) представляет основную область действия данного типа обмена, а внешняя (пунктирная линия) — возможную область (подчиненного) действия.

обменного гамильтониана (5), так и при проведении вычислений величин и определения знака обменного параметра  $\lambda$ . Совершенно по-особому следует рассматривать магнетики разл. типов (металлические, полупроводниковые и диэлектрические), кристаллы чистых элементов, их разл. сплавы (упорядоченные и неупорядоченные), аморфные твердые тела, *металлические стекла, спиновые стекла* и т. д., а также системы с локализованными или коллективизир. атомными магн. моментами. Во всех этих случаях требуется свой особый подход для выяснения типа обменной связи. Схематич. иллюстрацию ситуации обменной проблеме для магнетиков даёт наглядная схема, предложенная Херрингом (С. Herfing, 1966) (рис.).

Лит.: Helsenberg W., Mehrkörperprobleme und Resonanz in der Quantenmechanik 1-2, *z. Phys.*, 1926, Bd 38, S. 411; 1927, Bd 41, S. 239; его же, Zur Theorie des Ferromagnetismus, *z. Phys.*, 1926, Bd 40, S. 619; его же, Über die Spectra von Atomsystemen mit zwei Elektronen, *z. Phys.*, 1926, Bd 39, S. 499; Heitler W., London F., Wechselwirkung neutraler Atome und homopolare Bindung nach der Quantenmechanik, *z. Phys.*, 1927, Bd 44, S. 455; Дигас Р., Quantum mechanics of many-electron systems, *Proc. Roy. Soc.*, 1929, v. 123, p. 714; Ван Влекк J. H., The theory of electric and magnetic susceptibilities, *Rev.*, 1932; H e r f i n g C., в кн.: Magnetism, ч. 4, N. Y., 1968; Волосовский В. С. В., Magnetism, М., 1971; Нагаев Э. Д., Магнетики со сложными обменными взаимодействиями, М., 1988. С. В. Волосовский.

**ОБЩЕНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ** — характеристика отклика системы на внеш. воздействие. Внеш. силы (механич., электрич., магн.), соответствующие этому воздействию, описываются добавлением к гамильтониану  $H_0$  системы, на к-рую воздействуют, члена вида  $F(t)$ , где в классич. случае  $x$  — *общённая координата* системы, в квантовом случае — соответствующий оператор,  $F(t)$  — *общённая сила*, связанная с этой координатой (сопряжённая ей). Обобщённая сила определяется только внеш. условиями, она не зависит от свойств системы и является заданной ф-цией времени как в классическом, так и в квантовом случае.

О. в. (ф-ция отклика) яв. воздействие обладают рядом свойств, не зависящих от конкретного вида внеш. воздействия (напр., свойством аналитичности), что позволяет получить для них общие выражения. Кроме того, через О. в. выражаются некоторые характеристики системы в отсутствие внеш. поля. Предполагается, что в отсутствие внеш. поля квазигомогич. среднее значение  $\langle x \rangle = 0$ . Тогда линейная связь между  $\langle x \rangle$  и обобщённой силой  $F(t)$  выражается через ф-цию  $\chi(t-t')$ :

$$\langle x(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(t-t') F(t') dt'$$

Отклик  $\langle x(t) \rangle$  не может зависеть от  $F(t')$  в моменты времени  $t < t'$ , т. е.  $\chi(t-t') = 0$  при  $t < t'$ , что является выражением *причинности принципа*. Выполнив преобразование Фурье, получим

$$\langle x(\omega) \rangle = \chi(\omega) F(\omega).$$

Ф-ция

$$\chi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(t) e^{i\omega t} dt,$$

определяющая поведение системы под действием внеш. поля, наз. О. в. Иногда вводят также обобщённый адмиттанс  $Y(\omega) = -i\omega\chi(\omega)$  и обобщённый импеданс  $Z(\omega) = i/\omega\chi(\omega)$ .

О. в.  $\chi(\omega)$  является в общем случае комплексной величиной:  $\chi(\omega) = \chi'(\omega) + i\chi''(\omega)$ . Поскольку величины  $\langle x \rangle$  и  $F(t)$  действительны, получаем:  $\chi'(\omega) = \chi'(-\omega)$  и  $\chi''(\omega) = -\chi''(-\omega)$ . Мнимая часть О. в. связана с диссипацией энергии в системе. Если на систему действует монохроматич. поле  $F(t) = \text{Re}\{e^{i\omega t}\}$ , то потери  $Q$  в единицу времени равны

$$Q = \omega\langle x(\omega) \rangle |f_0|^2/2.$$

Т. к. в устойчивых системах возможна только диссипация энергии ( $Q > 0$ ), то для них  $\chi''(\omega) > 0$ .

Матем. выражением принципа причинности является отсутствие полюсов у О. в. в верх. полуплоскости комплексной частоты. Это означает, что ф-ция  $\chi'(\omega)$  и  $\chi''(\omega)$  удовлетворяют *дисперсионным соотношениям*

$$\chi'(\omega) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-\chi''(E)}{E-\omega} dE.$$

Здесь  $P$  — символ главного значения интеграла и предполагается, что  $\chi \rightarrow 0$  при  $\omega \rightarrow \infty$ . Из дисперсионных соотношений и положительности  $\chi''(\omega)$  следует, что статическая величина  $\chi(0)$  положительна:

$$\chi(0) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \chi''(\omega) d\omega > 0.$$

В общем случае, когда О. в. зависит не только от времени, но и от координат (пространств. дисперсия), необходимо учитывать релятивистский принцип причинности: причина не может влиять на следствие, если их мировые точки разделены пространственноподобным интервалом. Поэтому в однорядной системе для фурье-образа О. в.  $\chi(q, \omega)$  (где  $q$  — волновой вектор) получим:

$$\chi'(q, \omega) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\chi''(E, q - uE/c - \omega/c)}{E - \omega} dE,$$

где параметр  $u$  пробегает значения  $1 < c, c - \text{ скорость света в вакууме}$  ( $u = 0$  соответствует обычным дисперсионным соотношениям).

Для определения О. в. по микроскопич. свойствам системы обычно используют *Кубо формулу*

$$\chi(\omega) = i\hbar^{-1} \int_0^{\infty} e^{i\omega t} \langle [\hat{x}(t), \hat{x}(0)] \rangle dt$$

(здесь  $[a, b]$  обозначает коммутатор величин  $a$  и  $b$ ), откуда можно получить т. в. с е к т р а л ь н о е представление для О. в.:

$$\chi(\omega) = \frac{1}{\hbar} \sum_n |\hat{x}_{nm}|^2 \left[ \frac{1}{\omega_{nm} - \omega - i0} + \frac{1}{\omega_{nm} + \omega + i0} \right],$$

где  $\hat{x}_{nm}$  — матричный элемент перехода из состояния с энергией  $\epsilon_n$  в состояние с энергией  $\epsilon_m$ , а  $\omega_{nm} = (\epsilon_m - \epsilon_n)/\hbar$  — соответствующая частота.

Мнимая часть О. в. (а следовательно, и диссипация энергии) связана с флуктуациями величины  $x$  при темп-ре  $T$  (т. в. *флуктуационно-диссипативная теорема*):

$$\chi''(\omega) = \hbar\omega^{-2} \text{cth}(\hbar\omega/2kT).$$

Для неск. флуктуирующих величин  $x_i$  эта теорема обобщается следующим образом:

$$\langle \hat{x}_i(\omega) \hat{x}_k(\omega) \rangle = (i\hbar/2) [\chi_{ki}^* - \chi_{ik}] \text{cth}(\hbar\omega/2kT).$$

Отсюда можно получить важные соотношения симметрии для О. в. В отсутствие внеш. магн. поля  $H$ :  $\chi_{ik}(\omega) = \chi_{ki}(\omega)$ . При наличии магн. поля  $\chi_{ik}(\omega, H) = \chi_{ki}(\omega - H)e_i e_k$ , где  $e_i$  и  $e_k$  принимают значения  $\pm 1$  в зависимости от того, как меняются знаки величин  $x_i$  и  $x_k$  при обращении времени. Эти соотношения можно рассматривать как обобщение принципа симметрии кинетич. коэф. (см. *Олсгера теорема*).

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Статистическая физика, ч. 1, 3 изд., М., 1976; Зубарев Д. Н., Неравновесная статистическая термодинамика, М., 1971.

О. в. Дологов. **ОБЩЕНАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА** — ядерная модель, одновременно учитывающая как одностатичные (нулевые), так и коллективные (колебательные и вращательные) степени свободы атомного ядра (см. *Коллективные возбуждения ядра*). О. м. я. представляет собой дальнейшее развитие *оболочечной модели* (независимых нуклонов), к-рая не объясняет ряд опытных фактов: большие величины электрич. *квадрупольных моментов*

ядра, природу слабо возбуждённых состояний ряда чётно-чётных и нечётных ядер и вероятностей перехода между ними.

О. м. я. предложена О. Бором (A. Bohr) и Б. Моттelsonом (B. H. Mottelson) в нач. 1950-х гг.; она основана на предположении о независимом движении нуклонов в поле с медленно меняющимся потенциалом. Нуклоны внутри заполненных оболочек образуют «остов», к-рый обладает коллективными степенями свободы и описывается с помощью модели жидкой капли (см. *Канальная модель ядра*). Нуклоны внешних, незаполненных оболочек, взаимодействуя с поверхностью этой капли, образуют оболочки, как правило, несферической, самоогласов. потенциал. Адаптивность изменения этого потенциала позволяет выделить одночастичное движение нуклонов, происходящее в фиксир. потенциале, от коллективного движения, приводящего к изменению формы и ориентации ср. поля ядра. Такой подход аналогичен разделению движения электронов и ядер в молекулах.

В ядрах, близких к магическим ядрам, статич. деформация остова внеш. нуклонами меньше или сравнима с деформацией, обусловленной его нуклонными колебаниями. Эти ядра имеют сферич. форму, и коллективное движение в них связано с колебанием поверхности ядра. Наиб. развиты квадрупольные колебания, к-рые образуют спектр низших возбуждённых состояний большинства сферич. ядер (см. *Канальные возбуждения ядра*). Для ядер, удалённых от магических, статич. деформация больше динамической. Эти ядра являются деформированными (см. *Деформированные ядра*). Они обладают аномально большим электрич. квадрупольным моментом и имеют спектр вращат. возбуждений (см. *Вращательное движение ядра*).

Использование канальной модели для остова является упрощением (позволяющим избежать сложных многочастичных расчётов в оболочечной модели). Поэтому О. м. я. является феноменологической с априорным введением коллективных степеней свободы. Коллективный гамма-тонан этой модели содержит феноменологич. параметры (жесткость, массовые коэф. и т. п.), индивидуальные для каждого ядра. Результаты количеств. расчёта этих параметров на основе канальной или оболочечной модели не совпадали с экспериментом. Так, вычисления момента инерции по канальной модели приводили к значениям, на порядок меньшим наблюдаемых, а по оболочечной модели — в 2—3 раза большим наблюдаемых. Тем не менее О. м. я. позволила объяснить большие электрич. квадрупольные моменты ядер, усиление электрич. квадрупольных переходов с низших возбуждённых состояний и вредскавала вращат. возбуждения ядер.

Дальнейшее развитие О. м. я. связано с появлением теории сверхпроводимости. Использование идей этой теории и методов теории квантовых многочастичных систем позволило дать микроскопич. обоснование О. м. я. (см. *Сверхтекучая модель ядра*).

Лит.: Бор О., Моттelson Б., Структура атомного ядра, пер. с англ., т. 1, М., 1971. И. М. Павличенко.

**ОБЩЕНАЯ ФУНКЦИЯ** — матем. понятие, обобщающее классич. понятие ф-ции. Потребность в таком обобщении возникает во многих техн., физ. и матем. задачах. Понятие О. ф. даёт возможность выразить в математически корректной форме такие идеализир. понятия, как плотность материальной точки, точечного заряда, точечного диполя, плотность (пространств.) простого или двойного слоя, интенсивность мгновенного источника и т. д. С др. стороны, в понятии О. ф. находят отражение тот факт, что реально нельзя измерить значение физ. величины в точке, а можно измерять лишь её ср. значения в достаточно малых окрестностях данной точки. Т.о., О. ф. служат удобным и адекватным аппаратом для описания распределений разл. физ. величин, поэтому О. ф. наз. также р а с п р е д е л е н и я м и.

О. ф. были введены впервые в кон. 20-х гг. 20 в. П. Дираком (P. A. M. Dirac) в его исследованиях по квантовой механике. Основы матем. теории О. ф. были заложены С. Л. Соболевым в 1936 при решении задачи Коши для гиперболич. ур-ний, а в 50-х гг. Л. Шварц (L. Schwartz) дал систематич. изложение теории О. ф. и указал на применение. Теория О. ф. имеет многочисл. применения и вошла в обиход математиков, физиков и инженеров.

Основные определения. Формально О. ф.  $f$  определяют как линейный непрерывный функционал над тем или иным векторным пространством достаточно «хороших» (основных) ф-ций  $\varphi(x)$ ;  $f: \varphi \rightarrow (f, \varphi)$ . Важным примером основного пространства является пространство  $D(O)$  бесконечно дифференцируемых финитных в открытом множестве  $O \subset \mathbb{R}^n$  ф-ций  $\varphi$ . Наим. замкнутое множество, вне к-рого  $\varphi = 0$ , наз. и м н о ж е с т в о м  $\varphi$ . Последовательность  $\varphi_k$  сходится к ф-ции  $\varphi$  в  $D(O)$ , если носители ф-ций  $\varphi_k$  содержатся в нек-ром ограниченном замкнутом подмножестве  $O$  и любая произвольная ф-ция  $\varphi_k(x)$  сходится при  $f \rightarrow \infty$  равномерно по  $x$  к соответствующей произвольной ф-ции  $\varphi(x)$ .

Примером основной ф-ции из  $D(\mathbb{R}^n)$  служит «шпалочка»

$$\omega_\alpha(x) = \begin{cases} C \exp[-\varepsilon^2(\varepsilon^2 - |x|^2)], & |x| \leq \varepsilon, \\ 0, & |x| > \varepsilon; \end{cases} \int \omega_\alpha(x) dx = 1.$$

Соответствующее  $D(O)$  пространство О. ф. обозначают  $D'(O)$ ;  $D = D(\mathbb{R}^n)$ ,  $D' = D'(\mathbb{R}^n)$ . Сходимость последовательности О. ф. из  $D'(O)$  определяют как с л а б у ю с х о д и м о с т ь функционалов в  $D'(O)$ , т. е.  $f_k \rightarrow 0$ ,  $k \rightarrow \infty$  в  $D'(O)$  означает, что  $(f_k, \varphi) \rightarrow 0$ ,  $k \rightarrow \infty$  для всех  $\varphi \in D(O)$ .

Для того чтобы линейный функционал  $f$  на  $D(O)$  был О. ф. в т. е.  $f \in D'(O)$ , необходимо и достаточно, чтобы для любого открытого множества  $O' \in O$  существовали числа  $K$  и  $m$  такие, что

$$|(f, \varphi)| \leq K \|\varphi\|_m, \quad \varphi \in D(O'), \quad (1)$$

где  $\|\varphi\|_m$  означает верх. граф модуля  $\varphi$  и её производных порядка  $\alpha \leq m$ .

Если в неравенстве (1) целое число  $m$  не зависит от  $O'$ , то О. ф.  $f$  имеет конечный порядок; наименьшее такое  $m$  наз. по порядку  $m$  в  $D(O)$ . Т.о., в силу (1) всякая О. ф.  $f$  из  $D'(O)$  имеет конечный порядок в любом  $O' \in O$ .

Пространство  $D'(O)$  — полное: если последовательность О. ф.  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , из  $D'(O)$  такова, что для любой ф-ции  $\varphi \in D(O)$  числовая последовательность  $(f_k, \varphi)$  сходится, то функционал  $(f, \varphi) = \lim_{k \rightarrow \infty} (f_k, \varphi)$  принадлежит  $D'(O)$ .

Простейшими примерами О. ф. являются функционалы, порождаемые локально интегрируемыми в  $O$  ф-циями:

$$\varphi \rightarrow (f, \varphi) = \int (x) \varphi(x) dx, \quad \varphi \in D(O). \quad (2)$$

О. ф., определяемые локально интегрируемыми в  $O$  ф-циями  $f(x)$  по ф-ле (2), наз. р е г у л я р н ы м и О. ф.; в  $O$ ; остальные О. ф. наз. с и н г у л я р н ы м и.

Примером сингулярной О. ф. в  $\mathbb{R}^n$  служит *дельта-функция* Дирака,  $(\delta, \varphi) = \varphi(0)$ ,  $\varphi \in D$ . Она описывает плотность массы 1, сосредоточенной в точке  $x = 0$ . При этом «шпалочка»  $\omega_\delta(x)$  аппроксимирует  $\delta$ -функцию,  $\omega_\delta \rightarrow \delta$ ,  $\varepsilon \rightarrow +0$  в  $D'$ . Пусть  $f \in D'(O)$  и  $\omega_\delta(x) = (f, \omega_\delta(x))$  наз. *регуляризованной* О. ф.  $f_\delta$  и  $f_\delta \rightarrow f$ ,  $\varepsilon \rightarrow +0$  в  $D'(O)$ . Более того, всякая  $f$  из  $D'(O)$  есть слабий предел ф-ции из  $D(O)$ . Последнее свойство иногда берут в качестве исходного для определения О. ф., что вместе с теоремой о полноте пространства О. ф. приводит к эквивалентному определению О. ф.

О. ф., вообще говоря, не имеют значений в отд. точках. Тем не менее можно говорить о совпадении О. ф. с локально интегрируемой ф-цией на открытом множестве: О. ф.  $f$  из  $D'(O)$  совпадает в  $O' \subset O$  с локально ин-

тегрируемой в  $O'$  функции  $f_0(x)$ , если её сужение на  $O'$  есть  $f_0$ , т. е. в соответствии с (2)

$$(f, \varphi) = \int f_0(x)\varphi(x)dx$$

для всех  $\varphi \in D(O')$ , при этом считается  $f = f_0(x)$ ,  $x \in O'$ . В частности, при  $f_0 = 0$  получается определение того, что  $O. \text{ ф. } f$  обращается в нуль в  $O'$ . Множество точек  $O$ , ни в какой окрестности которых  $O. \text{ ф. } f$  не обращается в нуль, наз. в соответствии с  $O. \text{ ф. } f$  обозначается супр. Если  $\text{supr } f \in O$ , то  $O. \text{ ф. } f$  наз.  $\Phi$ -функцией в  $O$ .

Справедлива теорема о кусочном склеивании  $O. \text{ ф.}$  Пусть в окрестности  $U_y \subset O$  каждой точки  $y$  задана  $O. \text{ ф. } f_y$  из  $D'(U_y)$ , причём элементы  $f_y$  согласованы, т. е.  $f_{y_1} = f_{y_2}$  в  $U_{y_1} \cap U_{y_2}$ ; тогда существует  $O. \text{ ф. } f$  из  $D'(O)$ , совпадающая с  $f_y$  в  $U_y$  при всех  $y \in O$ .

Напр., для  $\delta$ -функции Дирака:  $\text{supr } \delta = \{0\}$ .  $O. \text{ ф. } \mathcal{S}(1/x)$ , определяемая равенством

$$(\mathcal{S}(1/x), \varphi) = \mathcal{S} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)x^{-1}dx, \quad \varphi \in D(\mathbb{R}^1),$$

наз. *главным значением интеграла* от  $\Phi$ -функции  $1/x$ ;  $\text{supr } \mathcal{S}(1/x) = \mathbb{R}^1$ .  $O. \text{ ф. } \mathcal{S}(1/x)$  сингулярна в  $\mathbb{R}^1$ , однако на открытом множестве  $x \neq 0$  она регулярна и совпадает с  $1/x$ .

Поверхностная  $\delta$ -функция. Пусть  $U$  — кусочно гладкая поверхность и  $\mu$  — непрерывная  $\Phi$ -функция на  $S$ .  $O. \text{ ф. } \mu \delta_S$  определяется равенством

$$(\mu \delta_S, \varphi) = \int_S (\mu(x)\varphi(x))dS_x.$$

При этом  $\mu \delta_S(x) = 0$  вне  $S$ ,  $\mu \delta_S$  — сингулярная  $O. \text{ ф.}$  Эта  $O. \text{ ф.}$  описывает пространств. плотность масс или зарядов, сосредоточенных на поверхности  $S$  с поверхностной плотностью  $\mu$  (и плотность простого слоя).

Линейные операции над  $O. \text{ ф.}$  вводят как расширение соответствующих операций над основными  $\Phi$ -функциями.

Замена переменных. Пусть  $f \in D'(O)$  и  $x = Ay + b$  — линейное преобразование  $O$  на  $O_1$ ,  $\det A \neq 0$ .  $O. \text{ ф. } f(Ay + b)$  из  $D'(O_1)$  определяется равенством

$$(f(Ay + b), \varphi) = \int \frac{\varphi(A^{-1}(x-b))}{|\det A|} dx, \quad \varphi \in D(O_1). \quad (3)$$

В частности, если  $A = \lambda I$ ,  $\lambda \neq 0$  ( $x = \lambda y$  — подобие), то  $(f(\lambda y), \varphi) = |\lambda|^{-1}(f, \varphi(x/\lambda))$ ; если  $A = I$  ( $x = y + b$  — сдвиг на  $b$ ), то  $(f(y + b), \varphi) = (f, \varphi(x - b))$ .  $\Phi$ -ла (3) позволяет определить трансляционно инвариантные, сферически симметричные, центральные симметричные, однородные, периодические и т. д.  $O. \text{ ф.}$

Пусть непрерывно дифференцируемая  $\Phi$ -функция  $a$  имеет только простые нули  $x_1, x_2, \dots$  на оси  $\mathbb{R}^1$ .  $\Phi$ -цикло  $\delta(a(x))$  определяется равенством

$$\delta(a(x)) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\delta(x - x_k)}{|a'(x_k)|}.$$

Напр.,  $\delta(-x) = \delta(x)$ ;  $(\delta(x - x_0), \varphi) = \varphi(x_0)$ ;  $\delta(x^2 - a^2) = (2a)^{-1}[\delta(x - a) + \delta(x + a)]$ ,  $a > 0$ ;

$$\delta(\sin x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(x - k\pi).$$

Произведение. Пусть  $f \in D'(O)$  и  $a \in C^\infty(O)$ , произведение  $af = fa$  определяется равенством

$$(af, \varphi) = (f, a\varphi), \quad \varphi \in D(O).$$

Оказывается, что  $af \in D'(O)$  и для обычных  $\Phi$ -функций произведение  $af$  совпадает с обычным умножением  $\Phi$ -функций  $f(x)$  и  $a(x)$ . Напр.,  $a(x)\delta(x) = a(0)\delta(x)$ ;  $x\mathcal{S}(1/x) = 1$ .

Однако эта операция произведения не допускает распространения на любые  $O. \text{ ф.}$  так, чтобы она была ассоциативной и коммутативной. В некоторых классах  $O. \text{ ф.}$

такое произведение можно определить, однако оно может оказаться неоднозначным.

Дифференцирование. Пусть  $f \in D'(O)$ . Обобщённую производную  $O. \text{ ф. } f$

$$\partial^\alpha f(x) = \frac{\partial^{|\alpha|} f(x)}{\partial x_1 \dots \partial x_n}, \quad |\alpha| \equiv \alpha_1 + \dots + \alpha_n,$$

порядка  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  определяются равенством

$$(\partial^\alpha f, \varphi) = (-1)^{|\alpha|} (f, \partial^\alpha \varphi), \quad \varphi \in D(O). \quad (4)$$

Т. к. операция  $f \rightarrow (-1)^{|\alpha|} \partial^\alpha f$  линейна и непрерывна, то функционал  $\partial^\alpha f$ , определяемый правой частью равенства (4), есть  $O. \text{ ф.}$  из  $D'(O)$ .

Имеют место след. свойства: операция  $f \rightarrow \partial^\alpha f$  линейна и непрерывна, любая  $O. \text{ ф.}$  из  $D'(O)$  бесконечно дифференцируема (в обобщённом смысле); дифференцирование не зависит от порядка; справедлива  $\Phi$ -ла Лейбница для дифференцирования произведения  $af$ , где  $a \in C(O)$ ; дифференцирование не увеличивает носителя; всякая  $O. \text{ ф. } f$  из  $D'(O)$  во всяком открытом множестве  $O'$  есть нек-рая производная от непрерывной  $\Phi$ -функции в  $O'$ ; любое дифференц. ур-ние  $Lu = f$ ,  $f \in D'(O)$  с пост. коэф. разрешимо в  $D'(O)$ ; любая  $O. \text{ ф. } f$  порядка  $N$  с носителем в точке  $0$  единств. образом представляема в виде

$$f(x) = \sum_{|\alpha| < N} a_\alpha \partial^\alpha \delta(x).$$

Напр.,  $\theta'(x) = \delta(x)$ , где  $\theta$  —  $\Phi$ -функция Хевисайда:

$$\theta(x) = 1, x \geq 0; \theta(x) = 0, x < 0; (\delta', \varphi) = -\varphi'(0);$$

$\Phi$ -ция  $-\delta'(x)$  описывает плотность зарядов, соответствующую дипольному моменту, равного  $+1$  в точке  $x = 0$  и ориентированного вдоль положительного направления оси  $x$ .

Обобщённый  $\delta'(x)$  является нормальная производная от плотности простого слоя на ориентируемой поверхности  $S$ :

$$\left( \frac{\partial}{\partial n} (\mu \delta_S), \varphi \right) = - \int_S \mu \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS_x.$$

$O. \text{ ф. } -\delta(\mu \delta_S)/\partial n$  описывает пространств. плотность зарядов, соответствующих распределению диполей на поверхности  $S$  с поверхностной плотностью момента  $\mu$  и ориентированных вдоль заданного направления нормали  $n$  на  $S$  (плотность двойного слоя).

Общее решение ур-ния  $xu = 0$  в классе  $D'(\mathbb{R}^1)$  есть  $u(x) = C\delta(x)$ ;

$$x^m \delta^{(k)}(x) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, m-1.$$

Тригонометрич. ряд

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \exp(ikx), \quad |a_k| \leq A(1 + |k|)^m$$

сходится в  $D'$ , и его можно дифференцировать в  $D'$  почленно любое конечное число раз;

$$(2\pi)^{-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(ikx) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(x - 2k\pi).$$

Прямое произведение. Пусть  $f(x)$  и  $g(y)$  — локально интегрируемые  $\Phi$ -функции в пространствах  $\mathbb{R}^n$  и  $\mathbb{R}^m$  соответственно.  $\Phi$ -цикл  $f(x) \times g(y)$  локально интегрируема в  $\mathbb{R}^{n+m}$ , она определяет регулярную  $O. \text{ ф.}$

$$(f(x) \times g(y), \varphi) = \int f(x) \int g(y) \varphi(x, y) dx dy = (f(x), (g(y), \varphi)), \quad \varphi(x, y) \in D, \quad (5)$$

наз. *прямым произведением*  $f$  и  $g$ .  $\Phi$ -ла (5) служит основой для определения прямого произведения  $O. \text{ ф. } f(x)$  из  $D'(\mathbb{R}^n)$  и  $g(y)$  из  $D'(\mathbb{R}^m)$ . Прямое произведение

коммутативно и ассоциативно. Напр.,  $\delta(x) = \delta(x) \times \dots \times \delta(x)$ .

**Свёртка.** Если  $f(x)$  и  $g(x)$  локально интегрируемы в  $\mathbb{R}^n$  и ф-ция  $h(x) = \int |g(y)|f(x-y)dy$  также локально интегрируема в  $\mathbb{R}^n$ , то свёрткой  $f * g$  наз. ф-ция

$$(f * g)(x) = \int f(y)g(x-y)dy.$$

Эта ф-ция локально интегрируема в  $\mathbb{R}^n$  и определяет регулярную О. ф.:

$$(f * g, \varphi) = \int f(x)g(y)\varphi(x+y)dx dy = (f(x) \times g(y), \varphi(x+y)), \quad \varphi \in D. \quad (6)$$

Свёртка заведомо существует, если одна из ф-ций  $f$  или  $g$  финитна. Если свёртка существует, то она коммутативна:  $f * g = g * f$ ; справедливы ф-лы дифференцирования свёртки:

$$f * \partial^\alpha g = \partial^\alpha(f * g) = \partial^\alpha f * g.$$

Если учесть, что  $f * \delta = \delta * f = f$ , получим  $\partial^j f = f * \delta^j$ .

Свёртка, вообще говоря, не ассоциативна. Однако если рассмотреть, напр., совокупность  $D^+$  О. ф. из  $D^+(\mathbb{R}^1)$ , обращаящихся в нуль при  $x < 0$ , то их свёртка существует и ассоциативна.

О. ф. из  $D^+$  наз. фундаментальными решеними в нем (ф-цией точечного источника) дифференц. оператора  $L(\partial)$  с пост. коэффициентами, если она удовлетворяет ур-нию

$$L(\partial)\delta(x) = \delta(x).$$

Зная фундам. решение  $\delta$  оператора  $L(\partial)$ , можно построить решение ур-ния  $L(\partial)u = f$  для тех  $f$  из  $D^+$ , для к-рых свёртка  $f * \delta$  существует, и это решение даётся ф-лой  $u = f * \delta$ . Напр., для ур-ния  $\Delta u = \delta(x)$

$$\delta(x) = \ln|x|/2\pi, \quad n=2; \quad \delta(x) = -1/4\pi|x|, \quad n=3$$

(см. также *Грина функция*).

Преобразования Фурье определяют для класса О. ф.  $S' = S'(\mathbb{R}^n)$  медленного роста. Пространство основных ф-ций  $S = S(\mathbb{R}^n)$  состоит из ф-ций, убывающих на бесконечности вместе со всеми производными быстрее любой степени  $|x|^{-1}$ . Норма в  $S$  задаётся выражением

$$\|f\|_p = \sup_{|x| \leq p} (1 + |x|^2)^{p/2} |\partial^\alpha f(x)|, \quad \varphi \in S, \quad p = 0, 1, \dots$$

Локально интегрируемые в  $\mathbb{R}^n$  ф-ция медленного роста содержится в  $S'$ , определяя по ф-ле (2) регулярные функции на  $S$ . Всякая О. ф. из  $S'$  есть нек-рая произвольная от непрерывной ф-ции медленного роста и, стало быть, имеет конечный порядок в  $\mathbb{R}^n$ .

Преобразование Фурье  $F[f]$  О. ф.  $f$  из  $S'$  определяется равенством

$$(F[f], \varphi) = (f, F[\varphi]), \quad \varphi \in S,$$

где

$$F[\varphi](\xi) = \int \varphi(x) \exp(i(\xi, x)) dx, \quad \varphi \in S$$

классич. преобразование Фурье. Обратная операция и  $F$ :

$$F^{-1}[f] = (2\pi)^{-n} F[f(-\xi)], \quad f \in S'.$$

Основные ф-лы для  $f \in S'$ :

$$\partial^\alpha F[f] = F[(ix)^\alpha f], \quad x^\alpha = x_1^\alpha \dots x_n^\alpha,$$

$$F[\partial^\alpha f] = (i\xi)^\alpha F[f]; \quad F[f * g] = F[f]F[g],$$

если  $g$  финитна. Если О. ф.  $f$  — периодическая с перио-

дом  $T = (T_1, \dots, T_n)$ ,  $T_j > 0$ , то  $f \in S'$  и её можно разложить в тригонометрич. ряд

$$f(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}^n} c_k(f) \exp(i(k, x)), \quad |c_k(f)| \leq A(1 + |k|)^m,$$

сходящийся к  $f$  в  $S'$ ; здесь

$$\omega = \left( \frac{2\pi}{T_1}, \dots, \frac{2\pi}{T_n} \right), \quad k\omega = \left( \frac{2\pi k_1}{T_1}, \dots, \frac{2\pi k_n}{T_n} \right).$$

Напр.,  $F[x^j] = (2\pi)^{-n} (-i)^j \partial^j \delta(\xi)$ , в частности  $F[1] = (2\pi)^n \delta(\xi)$ ;  $F[\partial^\alpha \delta] = (-i\xi)^\alpha$ , в частности  $F[\delta] = 1$ ;  $F(\theta) = i(\xi \cdot \theta + i0) = \rho \delta(\xi) + i\sigma \delta'(1/\xi)$ .

**Преобразование Лапласа** в одномерном случае. Пусть  $S'_+$  — пересечение множеств  $S'$  и  $D'_+$ , тогда множество О. ф. из  $D'_+$ , таких, что  $f(x)\exp(-\sigma x) \in S'_+$  при всех  $\sigma > a$ , обозначают  $D'_+(a)$ . Если  $f$  и  $g \in D'_+(a)$ , то  $f * g \in D'_+(a)$ , причём  $(f * g)\exp(-\sigma x) = f\exp(-\sigma x) * g\exp(-\sigma x)$ ,  $\sigma > a$ .

Пусть  $f \in D'_+(a)$ , тогда преобразование Лапласа  $f$  есть

$$L_f(p) = F[f(x)\exp(-\sigma x)](-i\omega) = 2\pi^{-1} F[f(x)\exp(-\sigma x)](\omega), \quad \sigma > a.$$

$L_f(p)$  — аналитич. ф-ция в полуплоскости  $\sigma > a$ . Ф-цию  $f(x)$  наз. оригиналом, ф-цию  $L_f(p)$  — изображением, между ними имеется взаимно однозначное соответствие  $f(x) \leftrightarrow L_f(p)$ ,  $\sigma > a$ . Обратное преобразование определяют равенством

$$f(x) = (2\pi)^{-1} \exp(\sigma x) F_\omega[L_f(\sigma + i\omega)](x), \quad \sigma > a.$$

Справедливы след. ф-лы:

$$\partial^m L_f(p) \leftrightarrow (-x)^m f(x),$$

$$p^m L_f(p) \leftrightarrow \partial^m f(x),$$

$$(f * g)(x) \leftrightarrow L_f(p)L_g(p).$$

Напр.,

$$\partial^m \delta(x - \xi) \leftrightarrow p^m \exp(-\xi p), \\ \xi \geq 0, \quad p - \text{любое}, \quad m = 0, 1, \dots$$

Лит.: Гельфанд И. М., Шилов Г. Е. *Обобщенные функции*, т. 1—3, М., 1958; Дирак П. А. М. *Принципы квантовой механики*, пер. с англ., 2 изд., М., 1970; Шварц Л. *Математические методы для физических наук*, пер. с франц., М., 1965; Влاديмир В. С., *Уравнения математической физики*, 5 изд., М., 1969; Готтше, *Обобщенные функции в математической физике*, 2 изд., М., 1979; Антонов П. М., Микусинский Я., Сикорский Р., *Теория обобщенных функций*, Севенскийский подход, пер. с англ., М., 1976; Рихтмайер Р., *Принципы современной математической физики*, пер. с англ., т. 1, М., 1982; Боголюбов Н. Н., Логанов А. А., Оксан А. В., Тодоров И. Т., *Общие принципы квантовой теории поля*, М., 1987.

В. С. Владимирова.

**ОБЩЕНЫЕ ИМПУЛЬСЫ** — ф-за. величины,  $p_i$ , определяемые ф-лами  $p_i = \partial T / \partial \dot{q}_i$ , где  $T$  — кинетич. энергия, или  $p_i = \partial L / \partial \dot{q}_i$ , здесь  $L$  — *Лагранжа функция*.  $T$  и  $L$  относятся к классич. механич. системе, зависят от *общих координат*  $q_i$ , *общённых скоростей*  $\dot{q}_i$  и времени  $t$ . Размерности О. и. зависят от размерности обобщённой координаты. Если размерность  $q_i$  — длина, то  $p_i$  имеет размерность обычного импульса, т. е. произведения массы на скорость; если же координатой  $q_i$  является угол (величина безразмерная), то  $p_i$  имеет размерность момента кол-ва движения, и т. д.

**ОБЩЕНЫЕ КООРДИНАТЫ** — независимые между собой параметры  $q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, s$ ) любой размерности, число к-рых равно числу степеней свободы механич. системы и к-рые однозначно определяют положение системы. Закон движения системы в О. и. даётся в ур-ниях вида  $\ddot{q}_i = q_i(t)$ , где  $t$  — время. О. к. используются при решении мн. задач, особенно когда система подчинена связям, налагающим ограничения на её движение. При этом значительно уменьшается число ур-ний, описывающих движение системы по срав-

ненно, напр., с у-рядами в декартовых координатах (см. Лагранжа уравнения механики). В системах с бесконечным числом степеней свободы (сплошные среды, физ. поля)  $O_k$  являются особые ф-ции пространств, координат и времени, наз. потенциалами, волновыми ф-циями и т. п.; при этом оказываются возможным характеризовать движение таких систем с помощью Лагранжа функции, зависящей определённым образом от выбранных  $O_k$ .

**ОБЩЕНЫЕ СИЛЫ** — величины  $Q_i$ , произведения  $k$ -рых на элементарные приращения обобщённых координат  $q_i$  системы дают выражение элементарной работы действующих на систему сил. Т. о., выражение элементарной работы сил, действующих на систему с  $s$  степенями свободы, через  $O_k$  с. имеет вид

$$\delta A = Q_1 \delta q_1 + Q_2 \delta q_2 + \dots + Q_s \delta q_s$$

С помощью Лагранжа функции  $L(O_k)$  с. определяются ф-лами  $Q_i = \partial L / \partial q_i$  (см. также Лагранжа уравнения механики).

Размерность  $O_k$  с. зависит от размерности соответствующей обобщённой координаты. Если размерность  $q_i$  — длина, то  $Q_i$  имеет размерность обычной силы; если же координата  $q_i$  — угол (величина безразмерная), то  $Q_i$  имеет размерность момента силы и т. п.  $O_k$  с. и обобщённые импульсы  $p_i$  связаны друг с другом так же, как обычные силы и импульсы, по второму закону Ньютона, т. е.  $dp_i/dt = Q_i$ .

**ОВОЩАЩЕННЫЙ СЛОЙ** — то же, что антизапорный слой.

**ОВОЛОЧЕННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА** — теория, основанная на представлении об атомном ядре как о системе нуклонов, движущихся независимо в потенциальном поле, создаваемом др. нуклонами. В более широком смысле с  $O_k$  м. я. связывают модели ядра, для к-рых это т. к. ср. поле и одночастичное движение нуклонов являются исходными пунктами, а коллективные движения описываются на основе одночастичного. Так понимаемая  $O_k$  м. я. — основа большинства совр. микроскопич. подходов в теории ядра. Обычно  $O_k$  м. я. противопоставляется модели жидкой капли, в к-рой ядро рассматривается как непрерывная среда и движение отд. нуклонов не выделено (см. Капельная модель ядра).

$O_k$  м. я. возникла в нач. 1930-х гг. на аналогии с моделью электронных оболочек атома. Её новизна было связано с обнаружением нерегулярностей в поведении энергии связи атомных ядер как ф-ции числа нейтронов в ядре  $N$  и протонов  $Z$  (массовое число  $A = N + Z$ ). Ядра, у к-рых числа  $N$  и  $Z$  соответствуют наиб. выраженным максимумам энергии связи (2; 8; 20; 28; 50; 82 и  $N = 126$ ), получили назв. *магических ядер*. Объяснение существования всех назв. ядер было дано М. Гённерт-Майер [М. Goepfert-Mayer] и Й. Х. Йенсенон (J. H. Jensen) [1] и отмечено Нобелевской премией.  $O_k$  м. я. сыграла большую роль в развитии ядерной физики и в создании микроскопич. подходов в теории ядра.

Одночастичная модель — простейший вариант  $O_k$  м. я. (нуклоны, движущиеся в ср. поле ядра, не взаимодействуют между собой). Волновая ф-ция ядра представляется в виде антисимметризов. произведения одночастичных волновых ф-ций  $\psi_k$  — решений одночастичного Шрёдингера уравнения. Входящий в это ур-ние потенциал  $O_k$  м. я. является суммой центрального  $U_c$  и спин-орбитального  $U_{sl}$  членов. В сферич. ядрах  $U_c$  и  $U_{sl}$  зависят только от модуля радиуса-вектора  $r$ . В качестве  $U_c$ , как правило, берут т. н. потенциал  $S$  Аксона — Вудса:

$$U_c(r) = U_0 f(r), f(r) = [1 + \exp\{(r - R)/d\}]^{-1}, \quad (1)$$

где  $R = r_0 A^{1/3}$  ( $r_0$  — параметр, приблизительно равный среднему расстоянию между нуклонами в ядре) и параметр  $d$ , определяющий толщину диффузионного слоя, обычно одинаковы для нейтронов и протонов, а глубина потенциальной ямы  $U_0$  для нейтронов и протонов при  $N \neq Z$  различна. Она состоит из двух слагаемых: изоскаляр-

ного члена  $U_0$ , одинакового для нейтронов и протонов, и изовекторного члена  $U_1$ , вклад к-рого пропорц. нейтронному избытку и имеет разный знак для нейтронов и протонов:

$$U_0, U_1 = U_0 + U_1(N - Z)/A. \quad (2)$$

Для протонов  $k$  (1) добавляется кулоновский потенциал. Его чаще всего аппроксимируют выражением для потенциала равномерно заряженной сферы.

Спин-орбитальный потенциал обычно полагают сосредоточенным в основном на поверхности ядра. Он аппроксимируется выражением

$$U_{sl} = W \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\hat{s} \hat{l}).$$

Здесь  $\hat{s}$  и  $\hat{l}$  — операторы спинового и орбитального угл. моментов, величина  $W$  определяется ф-лой, аналогичной (2). Существует множество наборов параметров потенциала  $O_k$  м. я., типичные их значения:  $U_0 \approx -50$  МэВ,  $U_1 \approx 20$  МэВ,  $r_0 \approx 1,25$  фм,  $d \approx \approx 0,6$  фм,  $W_0 \approx W_1 \approx 12$  МэВ фм<sup>3</sup>. Величина  $U_0$  заметно меньше  $U_c$ , но значительно превышает ср. энергию взаимодействия 2 нуклонов, к-рая по порядку величины колеблется от  $U_0/2$  до  $U_0 A^{1/3}$ , в зависимости от суммарного угл. момента взаимодействующей пары. Поэтому в ядрах, за исключением самых лёгких, осуществляется т. н.  $j$ -связь: орбитальный момент  $l$  и спин  $s$  складываются в полный угл. момент  $j$  нуклона, а векторы  $j$  отд. нуклонов складываются в полный угл. момент ядра  $I$ .

Состояние нуклона в сферич. ядре характеризуется полным моментом  $j$  и чётностью  $\pi$ . Это определяет и орбитальный момент  $l$ , т. к. два возможных (по правилам сложения угл. моментов) значения  $l = j \pm 1/2$  отвечают разл. чётности  $\pi = (-1)^l$ . Состояния нуклона с одинаковыми  $l$ ,  $j$  нумеруют в порядке увеличения энергии гл. квантовым числом  $n = 1, 2, \dots$  (число узлов радиальной волновой ф-ции равно  $n - 1$ ). Разл. состояния нуклона принято обозначать:  $1s_{1/2}$  ( $n = 1, l = 0, j = 1/2$ );  $1p_{1/2}, 1p_{3/2}, 2s_{1/2}$ , и т. п. Проекция  $m$  вектора  $j$  на ось  $z$ -координаты может принимать  $(2j + 1)$  значений от  $-j$  до  $+j$ . В сферич. ядре энергия  $\epsilon_n^j$  ( $\lambda = n, l, j, m$ ) не зависит от  $m$  и одночастичные уровни  $(2j + 1)$ кратно вырождены. В отсутствие  $U_{sl}$  вырожденными были бы и уровни с  $j = l \pm 1/2$ . Т. к. матричный элемент  $(s|s|s)$  на ф-циях  $\psi_n(r)$  зависит от  $j$  [равен  $l/2$  для  $j = l + 1/2$  и  $-(l + 1)/2$  для  $j = l - 1/2$ ], то включение  $U_{sl}$  снимает это вырождение, причём уровень  $o$   $j = l + 1/2$  опускается вниз, а  $s$   $j = l - 1/2$  поднимается вверх. Расстояние между соответствующими уровнями — спин-орбитальное расщепление  $\Delta_{sl}$  пропорц.  $(2l + 1)$ . Эта закономерность хорошо подтверждается экспериментально.

Согласно одночастичной  $O_k$  м. я., нуклоны данного сорта ( $p$  или  $n$ ) заполняют  $j$ -уровень (подоболочку). Затем заполняется след. подоболочка. Подоболочки группируются в оболочки, разделённые энергетич. «зазорами», значительно превышающими ср. расстояние между уровнями (2—3 МэВ в лёгких ядрах и 0,5 МэВ — в тяжёлых). Эти «зазоры» наз. *маг. овами* и *пр. вета* м. я. (рис.).

Тенденция к группированию подоболочек в оболочки особенно выражена для потенциала гармонич. осциллятора, где в отсутствие  $U_{sl}$  вырождены все уровни с данным осцилляторным квантовым числом  $N = 2(n - 1) + l$  [2]. Причина этого явления связана с квазиклассич. условиями квантования орбит движения частицы в трёхмерной потенциальной яме [2]. Значения магич. чисел зависят от вида потенциала. На рис. приведена схема уровней для нейтронов и протонов в <sup>208</sup>Pb, рассчитанная для потенциала Аксона — Вудса. В более лёгких ядрах нек-рые детали схемы уровней изменяются, но в целом заполнение уровней происходит в соответствии со схемой (см. рис.). Она демонстрирует возникновение магич. чисел и роль в этом явле-

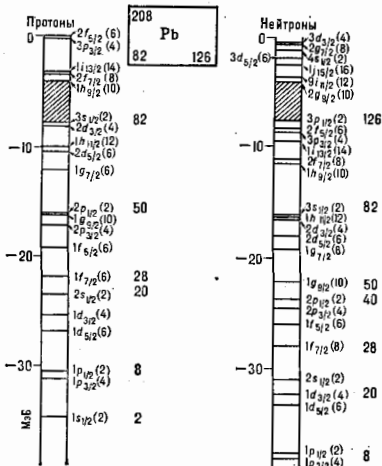


Схема одночастичных уровней  $^{208}\text{Pb}$  ( $N = 82$ ,  $Z = 126$ ) в потенциале Савсона - Вудса. В круглых скобках даны числа частиц на отдельных  $i$ -уровнях ( $N_i = 2i + 1$ ); справа указаны магические (и полумagicеские) числа, отвечающие заполнению оболочек. Загнтрихованы магюные просветы, отделяющие заполненные уровни от незаполненных.

шии  $U_{SL}$ . Первые оболочки:  $\{(1s_{1/2}), (1p_{3/2}, 1p_{1/2}), (1d_{5/2}, 2g_{7/2}, 1d_{3/2})\}$  совпадают с оболочками гармонического трёхмерного сферического симметричного осциллятора, где уровни внутри каждой оболочки были бы полностью вырождены. Почти такое же правило применимо и дальше, но здесь к данной оболочке присоединяется уровень из след. осцилляторной оболочки, имеющей наиб. значение  $l$ . Опускание уровней в ниж. оболочку связано с тем, что для дублетов с большими  $l$  спин-орбитальное расщепление происходит по величине магюные просветы. Именно эти сплуннившиеся в соседнюю оболочку ниж. уровни спин-орбитальных дублетов нейтронов и протонов с максимальными  $l$  и обеспечивают правильные значения магюч. чисел, кроме самых первых.

Помимо объяснения природы и правильного воспроизведения значений магюч. чисел одночастичная  $O. m. я.$  в большинстве случаев правильно описывает спины нечётных ядер. Она даёт одинаковые предсказания значений магю. и квадрупольных электрич. моментов, а также вероятностей  $\beta$  и  $\alpha$ -переходов в нечётных ядрах (ядра с нечётным  $A$ ). Так, магю. момент нечётного ядра в одночастичной  $O. m. я.$  (индекс од.) определяется только последним нуклоном и даётся простыми  $\Phi$ -ямами (Т. Шмидт, Th. Schmidt, 1937), содержащими только гиромог. отношения свободных нуклонов (см. Барюми). Согласно этим  $\Phi$ -ям, магю. момент [в единицах ядерного магнетона  $3,1524515(53) \times 10^{-19}$  МэВ/Гс] для протонно-нечётного ядра ( $Z$  нечётное,  $N$  чётное):

$$\mu = \mu_p = j[1 - 2,29/(j + 1)] \quad \text{при } j = l - 1/2;$$

$$\mu = \mu_p = j + 2,29 \quad \text{при } j = l + 1/2.$$

Для нейтронно-нечётного ядра:

$$\mu = \mu_n = 1,91j/(j + 1) \quad \text{при } j = l - 1/2;$$

$$\mu = \mu_n = -1,91 \quad \text{при } j = l + 1/2.$$

Т. о., в одночастичной  $O. m. я.$  магю. моменты нечётных ядер должны располагаться на двух парах т. н. линий Шмидта. Эксперим. значения  $\mu$  всегда находятся между линиями Шмидта, при этом, как правило, отличия  $\mu$  от шмидтовских значений порядка 20—30%. Магю. моменты нечётно-нечётных ядер с большой точностью равны векторной сумме магю. моментов соответствующих нечётных ядер.

Вероятности  $\alpha$ -магю. переходов магю. тина связаны с величинами магю. моментов. Так,  $M1$ -переходы связаны с излучением  $\gamma$ -кванта магю. дипольного излучения при изменении ориентации спинового магю. момента. Эксперим. значения вероятностей перехода  $B(M1)$ , как правило, отличаются от предсказаний одночастичной  $O. m. я.$  не более чем в 2—3 раза. Отдельно стоят т. н.  $i$ -запрещённые  $M1$ -переходы. Это одночастичные переходы с изменением орбитального момента  $l$  на 2, напр. переход  $d_{3/2} \rightarrow s_{1/2}$ . В одночастичной  $O. m. я.$  такие переходы строго запрещены, т. к. ответственный за них оператор спина не может изменить орбитальный момент частиц. В действительности эти переходы происходят, но с вероятностью на 2—3 порядка меньшей, чем разрешённые  $M1$ -переходы, в к-рых  $l$  не меняется (напр.,  $d_{3/2} \rightarrow d_{5/2}$ ). Снятие  $i$ -запрета связано с поправками к одночастичной  $O. m. я.$  [2]. Магю. переходы высших мультипольности также качественно объясняются мультипольностью  $O. m. я.$

Характеристики ядер  $O. m. я.$  описывают хуже. Электрич. квадрупольный момент протоннонечётного ядра с  $p_j$  протонами на незаполненном  $j$ -уровне в одночастичной  $O. m. я.$  даётся выражением

$$Q = -\frac{2}{5}(r_0^2)_{jj} \frac{j - p_j + 1/2}{j + 1}, \quad (3)$$

куда входит ср. значение  $(r_0^2)_{jj}$  от квадрата радиуса по состоянию  $\Phi_j(r)$ , зависимость к-рого от деталей потенциала  $O. m. я.$  невелика.  $\Phi$ -ял (3) правильно определяет знак квадрупольных моментов большинства протонно-нечётных ядер, но расхождения с экспериментом достигают иногда целого порядка. Ещё больше расхождения с экспериментом в случае нейтронно-нечётных ядер. Здесь  $O. m. я.$  предсказывает  $Q = 0$ , тогда как измеренные значения  $Q$  в большинстве случаев сравнимы с  $Q$  протонно-нечётных ядер.

Одночастичная  $O. m. я.$  предсказывает отсутствие электрич. квадрупольных переходов ( $E2$ ) в нейтронно-нечётных ядрах, а они идут почти с такими же вероятностями, что и в протонно-нечётных ядрах. В последних же расхождения с экспериментом в величине вероятностей ещё сильнее, чем в случае квадрупольных моментов. Наиб. сильные расхождения между эксперим. и теоретич. значениями квадрупольных моментов и вероятностей электрич. квадрупольных переходов наблюдались для ядер в области редкоземельных элементов ( $150 \leq A \leq 180$ ) и актинидов ( $A \geq 220$ ). Именно это обстоятельство наряду с нек-рыми др. фактами (напр., скачок в величине изотопич. смещений уровней атомных  $\alpha$ -электронов в районе  $A \approx 150$ ) послужило толчком к предположению о несферичности тяжёлых ядер (см. Деформированные ядра).

Одночастичные состояния в деформированных ядрах. Идеи  $O. m. я.$  были обобщены для описания одночастичных состояний в деформир. ядрах, где они служат основными ротат. полюс в нечётных ядрах. Все известные деформированные ядра аксиально симметричны. Кроме того, они обладают т. н.  $\beta$ -инвариантностью — симметрией по отношению к повороту на угол  $\beta$  относительно любой оси, перпендикулярной оси симметрии  $z$ . Статич. моменты деформир. ядер говорят о близости их формы к форме аксиального эллипсоида с характерными значениями параметра деформации (эксцентриситет эллипсоида)  $\delta \sim 0,2 - 0,3$ . В таком случае не зависящая от спина нуклона часть среднего ядерного потенциала может быть представлена в виде

$$U(r, \theta) = U_0(r) + U_2(r)P_2(\cos\theta), \quad (4)$$



где  $\theta$  — азимутальный угол,  $P_{\alpha}(z)$  — полином Лежандра. По масштабу величины  $|U_{2j} \sim \delta| U_{1j}$ . Аналогично модифицируется и выражение для  $U_{2j}[2]$ .

В аксиальном потенциале полный угл. момент частицы  $l$  не сохраняется, сохраняется лишь его проекция  $\Omega$  на ось  $z$ . При малых деформациях  $\delta$ , рассматривая второй член в (4) как малое возмущение, для уровня энергии можно получить

$$e_{n,l,i,j} = e_{n,l,i,j}^0 - \frac{3\Omega^2 - j(j+1)}{4j(j+1)} (U_{2j})_{n,l,i,j}, \quad (5)$$

где  $(U_{2j})_{n,l,i,j}$  — ср. значение  $U_{2j}(r)$  по состоянию  $(n, l, j)$ . Деформация ядра снимает вырождение по  $|\Omega|$ . Остаётся лишь как следствие  $R$ -инвариантности вырождение по знаку  $\Omega$ . В вытянутом ядре энергетически выгоднее состояния с малыми  $|\Omega|$ , в сплюснутом — с большими.

Деформация ядра разрушает оболочечную структуру одночастичных уровней. Это происходит из-за того, что уже при  $\delta \approx 0,2-0,3$  второй член в (5) превосходит по величине магтовый просвет между оболочками сферич. ядра и оболочка перенумеровывается. Однако при увеличении деформации снова возникает оболочечная структура, характеризующаяся чередованием густоты и разреженности одночастичных уровней.

При больших деформациях требуется численное решение уравн. Шрёдингера в деформир. внешнем поле, но качеств. картину можно понять, рассматривая потенциал ангармонического осциллятора с неравными частотами колебаний вдоль ( $\omega_z$ ) и перпендикулярно ( $\omega_{\perp}$ ) оси  $z$ ;  $\omega_z$  и  $\omega_{\perp}$  связаны с параметром деформации соотношениями:  $\omega_z \approx \omega_0(1 - 2\delta/3)$ ;  $\omega_{\perp} \approx \omega_0(1 + \delta/3)$ . В осцилляторном потенциале движение разделяется на независимые колебания вдоль и перпендикулярно оси  $z$ , а энергии

$$e_{n_z, n_{\perp}} = (n_z + 1/2)\hbar\omega_z + (n_{\perp} + 1/2)\hbar\omega_{\perp},$$

где  $n_z = n_x + n_y$  — полное число квантов колебания по осям  $x$  и  $y$ . Т. о., состояния с различными  $n_x$  и  $n_y$ , но с одним  $n_z$  вырождены. При значении  $\delta$  при  $k$ -ром оттошении осцилляторы частот рационально ( $\omega_z/\omega_{\perp} = p/q$ ;  $p, q$  — целые числа), возникает дополнит. вырождение уровней, отвечающих одному и тому же значению комбинации  $N = pn_z + qn_{\perp}$  (оболочечное квантовое число в деформир. ядрах). Хотя это вырождение по  $N$  в реальном ядре снимается из-за отличия ср. поля от потенциала осциллятора, тенденция к восстановлению оболочечной структуры с ростом параметра деформации  $\delta$  сохраняется и для неосцилляторных потенциалов.

**Смешивание конфигураций.** Многочастичная модель оболочек. В более совершенных вариантах О. м. я. помимо ср. поля вводится т. н. остаточное взаимодействие между нуклонами, т. е. дополнительное к взаимодействию, формирующему потенциал ср. поля. В результате как основной, одночастичной компоненте волновой ф-ции ядра примешиваются более сложные, многочастичные компоненты (конфигурации). В многочастичной О. м. я. выделяет один или несколько частично заполненных («валентных») уровней поверх инертного «остова» (заполненные оболочки) и пытаются учесть все возможные конфигурации частиц, находящихся на выделенных уровнях. При этом применяются методы теории *суперл.*,  $k$ -р-ые в простейших случаях позволяют однозначно найти многочастичную волновую ф-цию ядра. С ростом помера оболочки и числа валентных нуклонов вычислит. трудности быстро растут. Но даже в тех случаях, когда точный расчёт невозможен, из него сложно извлечь физически важную информацию.

Успешней оказались подходы, в  $k$ -рых рассматриваются лишь нек-рые многочастичные конфигурации, связанные с простейшими остовами возбуждениями, но кол-во «валентных» уровней достаточно велико или даже неограничено. Простейшее возбуждение остова

отвечает переходу одной из частиц остова в незаполненное состояние, в результате чего в остовае образуется «дырка». Соответствующие конфигурации наз. состояниями типа «частица-дырка». Полуларным методом является т. н. «приближение случайных фаз», в  $k$ -ром учтены возбуждения типа «1 частица — 1 дырка», а также наиб. существенные из возбуждений остова типа «2 частицы — 2 дырки».

Учёт смешивания конфигураций объясняет (по крайней мере, качественно)  $l$ -запрещённые переходы, отклонение магт. моментов от линий Шмидта, значения квадрупольных моментов нейтрально-нечётных ядер и нек-рые др. факты, непонятные с точки зрения одночастичной О. м. я. Кроме того, приближение случайных фаз служит основой описания в рамках О. м. я. коллективных возбуждений чётно-нечётных ядер — как низколежащих поверхностных *колебательных возбуждений ядер*, так и *гигантских резонансов* [2].

Одно из наиб. существенных проявлений остаточного взаимодействия — спаривание магт. нуклонов в ядре и ядерная сверхтекучесть (см. *Сверхтекучая модель ядра*). Одночастичная О. м. я. с учётом ядерной сверхтекучести в сочетании с капельной моделью применялась и к вычислению масс ядра и барьеров деления [3].

**Обоснование и интерпретация О. м. я.** Концепция квазичастиц. По характеру осн. идей О. м. я. тесно связана с таким микроколич. подходом, как приближение самогласов. поля. Простейший вариант теории самогласов. поля — метод Хартри — Фока в ядрах «работает» плохо из-за сильного взаимодействия между нуклонами. В методе Хартри — Фока с эфф. силами используется обычная для О. м. я. волновая ф-ция и вводится феноменологич. эффективное взаимодействие между нуклонами в ядре,  $k$ -рое отличается от взаимодействия двух свободных нуклонов (в частности, оно сильно зависит от плотности). Этот метод позволил количественно описать свойства ядра (энергии связи, радиусы и т. п.). В нём меньше «подгончатся» параметры, т. к. ср. поле,  $k$ -рое в О. м. я. задаётся независимо от остаточного взаимодействия, здесь рассчитывается.

Ключ к пониманию О. м. я., а также метода Хартри — Фока с эфф. силами дают теория ферми-жидкости Ландау и построенная на её принципах теория кохечных ферми-систем (ТКФС) [3]. Основа этих теорий — концепция квазичастиц, согласно  $k$ -рой в ферми-системе с сильным взаимодействием между частицами существует ветвь одночастичных фермионных возбуждений — квазичастиц, движущихся в ср. поле, создаваемом др. частицами. Если энергия квазиэлектричного возбуждения велика, то оно может жить достаточно долго; вероятность испытать неупругое столкновение мала из-за действия принципа Паули, резко ограничивающего число допустимых кохечных состояний. Свойства таких возбуждений похожи на свойства возбуждений газа невазимодействующих фермионов, помещённых в потенциальную яму. Так, спин их равен  $1/2$ , заряд по отношению к электр. полю равен  $e$  для протонной квазичастицы и  $0$  — для нейтронной. Все эти утверждения следуют из точных законов сохранения.

Квазичастицы взаимодействуют между собой. В большинстве случаев можно ограничиться парным взаимодействием квазичастиц,  $k$ -рое эффективно учитывает и многочастичные взаимодействия частиц и поэтому отличается от взаимодействия свободных нуклонов. В теории ферми-жидкости коллективные возбуждения системы описываются в терминах этого эфф. взаимодействия с помощью ур-ния, учитывающего явн. только двухчастичные корреляции и по форме совпадающего с ур-нием приближения случайных фаз. Именно возможность ограничить двухчастичными корреляциями обуславливает выигрыш при переходе от частиц к квазичастицам.

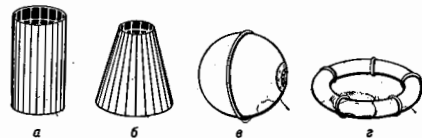
В теории кохечных ферми-систем эфф. взаимодействие квазичастиц предполагается универсальным для

всех ядер и задает феноменологически. Использование ур-ний ферми-жидкостного типа (см. *Квантовая жидкость*) позволило описать не только коллективные возбуждения чётных ядер, но также статич. электрич. и магн. мультипольные моменты, вероятности  $\alpha$ -лаб. и  $\beta$ -переходов в нечётных ядрах и мн. др. ядерные характеристики.

Концепция квазичастиц оказалась плодотворной и при описании глобальных ядерных свойств: энергий связи, плотностей, самосогласов. поля. Была сформулирована самосогласов. ТКФС, по своим возможностям совпадающая с методом Хартри — Фока с эфф. силами, но более последовательная [4]. Используемое эфф. взаимодействие квазичастиц зависит от их энергий и скоростей. Поэтому и ср. поле, действующее на квазичастицу, также зависит от её энергии и скорости [4]. Квазичастичные волновые ф-ции подчиняются ур-нию, подобному ур-нию Шрёдингера с зависящей от координат эфф. массой  $m^*(r)$ . Эфф. массы нейтронов и протонов в ядре очень близки к массам свободных нуклонов. О. м. я. сыграла важную роль в развитии ядерной физики и в создании современных микроскопич. подходов в теории ядра.

Лит.: 1) Гесперт-Майер М., Йенсен И., Элементарная теория ядерных оболочек, пер. с англ., М., 1958; 2) Бор О., Моттезельсо Е., Структура атомного ядра, пер. с англ., т. 1—2, М., 1971—77; 3) Мигдал А. В., Теория нечетных ферми-систем и свойства атомных ядер, 2 изд., М., 1983; 4) K h o d e l V. A., S a p e r s t e i n E. E., Finite Fermi systems theory and self-consistency relations, «Phys. Rep.», 1982, т. 92, № 5, p. 183. Э. Е. Саперштейн.

**ОБОЛОЧКА** — твердое деформируемое тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями, расстояние между к-рыми (толщина  $O$ ) мало по сравнению с двумя другими размерами. Поверхность, к-рая делит пополам толщину  $O$ , наз. срединной поверхностью; в зависимости от очертания  $O$  различаются по форме (рис.).  $O$  классифицируются также по полной кривизне срединной поверхности — т. н. гауссовой



Оболочки различной формы: а — цилиндрическая оболочка кругового сечения; б — коническая; в — сферическая; з — торoidalная.

кривизне: положительной — сферические, эллипсоидальные; нулевой — цилиндрические, конические; отрицательной — гиперболоид, параболоиды, тороидальные кругового или эллипсоидального сечения во внутр. его части.  $O$  могут иметь постоянную или переменную толщину. В зависимости от материала  $O$  могут быть изотропными или анизотропными.

Под воздействием внеш. нагрузок в  $O$  возникают внутр. усилия, равномерно распределенные по толщине (т. н. мембранные напряжения или напряжения в срединной поверхности), и усилия изгиба, образующиеся в сечениях  $O$ , изгибающие и крутящие моменты, а также поперечные силы. Благодаря наличию мембранных усилий  $O$  сочетает значит. жесткость и прочность со сравнительно малой массой. Если напряжениями изгиба при расчёте  $O$  можно пренебречь, то её наз. безмоментной. Наличие моментов характерно для участков  $O$ , прилегающих к краям (т. н. краевой эффект), в зонах быстрого изменения геометрии, вблизи мест приложения сосредоточенных нагрузок. Если напряжения лежат в пределах пропорциональности для материала  $O$ , то для расчёта  $O$  пользуются зависимостями *упругости теории*. В статич. расчёте на прочность и жесткость определяют напряжения, деформа-

ции и перемещения разл. точек  $O$  в зависимости от заданной нагрузки. Как правило, в расчётах на прочность прогиба  $O$  (перемещения вдоль нормали к срединной поверхности) могут считаться малыми по сравнению с толщиной  $O$ ; тогда соотношения между перемещениями и деформациями линейны; соответственно линейными (в упругой задаче) будут основные дифференц. ур-ния.

При определении несущей способности  $O$  часто встречаются случаи, когда осн. напряжения лежат за пределами действия *Гука закона* для материала  $O$ . Тогда в качестве исходных зависимостей следует принимать ур-ния *пластичности теории*. При проектировании конструкций из  $O$ , находящихся в условиях повышенных темп-р, надо учитывать соотношения *ползучести теории*.

Важным для  $O$  является расчёт на устойчивость (см. *Устойчивость упругих систем*). Специфич. особенность тонкостенных  $O$ . — потеря устойчивости в виде хлупка или прощелкивания, выражающегося в резком (катастрофич.) переходе от одного устойчивого равновесного состояния к другому. Этот переход наступает при разл. нагрузках, в зависимости от нач. несовершенств формы  $O$ , нач. напряжений и др. Если рассчитывать  $O$  на устойчивость с помощью линейных ур-ний (как это принято для стержней или пластинок), то можно определить лишь т. н. верхнюю критич. нагрузку. Реально  $O$  теряют устойчивость часто значительно раньше, в зависимости от указанных выше факторов. Поэтому устойчивые расчёты на устойчивость проводятся с помощью геометрически нелинейных зависимостей. Практич. расчёты должны вестись с учётом эксперим. данных, с их статистич. обработкой. При проектировании уникальных сооружений из  $O$ . — с учётом их устойчивости — целесообразно проводить предварит. эксперименты над их моделями. Своёобразие процесса потери устойчивости  $O$  описывается с геом. стороны *катастроф теорией*. Для обеспечения устойчивости равновесия  $O$  часто приходится подкреплять рёбрами, напр. фюзеляжи и крылья летат. аппаратов, некоторые типы тонкостенных перекрытий.

В задачах динамики  $O$  рассматриваются периодич. колебания и нестационарные процессы, связанные с быстрым, или ударным, нагружением. Раздел теории  $O$ , связанный с реакцией выполненных из них конструкций на быстро возрастающую нагрузку, наз. расчётом на динамику устойчивости. В отд. случаях несущая способность  $O$ , подверженных потере устойчивости, при быстром нагружении резко возрастает по сравнению со случаем медленного нагружения. Важным является при этом анализ процесса распространения упругих волн в материале  $O$ .

При обтекании  $O$  потоком жидкости или газа могут наступить неустойчивые (автоколебательные) режимы, определение к-рых составляет раздел т. н. гидро- или *аэроупругости*. К ним относятся явления классич. и навального флаттера; наблюдаются также явления срывного флаттера. Вынужденные колебания  $O$  под действием срывных течений носят хаотич. Вмн. разделов динамики  $O$  следует вести расчёт на основании нелинейных зависимостей.  $O$  широко применяются в качестве покрытий аэраий, в летат. аппаратах, деталях разл. машин и т. д.

Отд. класс  $O$  составляют т. н. мягкие  $O$ , применяемые, напр., для парашютов. Подобные  $O$  не могут иметь жестких зон; они являются также безмоментными. При воздействии срывных течений мягкие  $O$  подвергаются ползканию.

Наряду с металлиз.  $O$  в авиации, кораблестроении и др. областях техники всё более широко применяются  $O$ , изготовленные из композит. и керамич. материалов. К ним относятся также  $O$ , имеющие разл. строение по толщине, с чередующимися жесткими слоями и слоями связующего. Введение композит. материалов даёт возможность обеспечить необходимую прочность и

жёсткость конструкции при заметно снижающейся массе. Расчёты О., выполненных из композиц. материала, а также трёхслойных и многослойных О. представляют собой отд. разделы общей теории О.

Для расчёта О. как элементов конструкции наравне с аналитич. методами всё шире применяются самые различные числ. методы, реализуемые с использованием ЭВМ. Наиб. интенсивно развиваются методы конечных элементов и метод многоуровневых суперэлементов. Применяются также метод конечных разностей, метод динамик, программирования и др. Числ. методы служат для установления напряжённо-деформир. состояния О. и параметров их устойчивости и динамики. Подобные методы могут быть также приложены для анализа процесса возникновения и распространения трещин в материале О. При этом выводится т. н. сингулярные элементы, отображающие напряжённое состояние у вершины трещины. Такой анализ может служить для определения параметров т. н. лавинного процесса распространения трещин, напр. в магистральных трубопроводах.

Литм.: Власов В. З., Общая теория оболочек и ее приложения в технике, М.—Л., 1949; Новожилов В. В., Теория тонких оболочек, Л., 1951; Гольденвейзер А. Л., Теория упругих тонких оболочек, 2 изд., М., 1976; Амбарцумян С. А., Общая теория анизотропных оболочек, М., 1974; Вольмир А. С., Оболочки в потоке жидкости и газа, Задачи аэроупругости, М., 1978; е го же, Оболочки в потоке жидкости и газа, Задачи гидроупругости, М., 1979; Палли О. М., Спирин В. Е., Анизотропные оболочки в строительстве, Л., 1977; Методы расчёта оболочек, под ред. А. Н. Гузя, т. 1—5, К., 1980—82; Васильев В. В., Методы анализа конструкций из композиционных материалов, М., 1988.

А. С. Вольмир.

**ОБОРАЧИВАЮЩАЯ СИСТЕМА** — оптич. система, предназначенная для поворота изображения на  $180^\circ$  вокруг оптич. оси. О. с. используются в первую очередь в зрительских трубах для наблюдения наземных (а не астрономических) объектов и в микроскопах с целью восстановления правильной (прямой) ориентации изображения объекта, т. к. большинство объективов форми-



Рис. 1. Схема линзовой оборачивающей системы.

руют перевёрнутое. В этих приборах О. с. располагаются обычно между объективом и окуляром.

О. с. бывают призмными и линзовыми. Помимо оборачивающего действия О. с. может изменять габариты оптич. системы, укорачивая её (призмная О. с.) или удлиняя (линзовая О. с.). Обычно линзовая О. с. (рис. 1) состоит из двух сложных линз 2 и 3 и добавочной плоско-выпуклой линзы 1, наз. коллективной, расположенной вблизи фокальной плоскости объектива, предшествующего О. с. Коллектив 1 формирует изображение входного зрачка этого объектива между линзами 2 и 3, что позволяет свести к минимуму поперечные размеры О. с. Линзовая О. с. позволяет осуществлять скачкообразное или плавное (панкратическое) изменение масштаба изображения при перемещении всей О. с. или её отд. частей вдоль оптич. оси. Однако применение линзовых О. с. вызывает неизбежное ухудшение качества изображения, связанное с наличием таких трудноустраняемых aberrаций, как кривизна изображения и вторичный спектр. Линзовые О. с. используются в перископах подводных лодок.

В призмных О. с. наиб. употребительны призмочувствительные с взаимно перпендикулярными графами (т. н. призмы Порро). Проходя через неск. призм, луч испытывают полное внутр. отражение от граней и выходит параллельно своему первонач. направлению, а изображение объекта оказывается перевёрнутым на  $180^\circ$  без изменения величины. На рис. 2

представлена призмная оборачивающая О. с. Пехана, используемая в совр. малогабаритных биноклях. Преимуществом призмных О. с. перед линзовыми являются значительно меньшее расстояние между объективом и окуляром (что позволяет использовать их, напр., в биноклях) и значительно меньшие aberrации, легко поддающиеся компенсации aberrациями др. компонентов оптич. системы, как правило aberrациями объектива.

Рис. 2. Призмная оборачивающая система Пехана.

В нек-рых типах совр. оптико-электронных приборов используются волоконно-оптич. О. с. — т. н. поворотники, представляющие собой жгут оптич. волокон, выходной торец к-рых повернут на  $180^\circ$  относительно входного торца.

А. П. Грамматин.

**ОБОРОТНЫЙ МАЯТНИК** — прибор для эксперим. определения ускорения свободного падения  $g$ . Представляет собой физ. маятник в виде, напр., массивной пластины (рис.) с двумя трёхгранными ножами, из к-рых один неподвижен, а другой может перемещаться вдоль прорези на пластине. Острые рёбра ножей  $O_1$  и  $O_2$ , помещаемые попеременно на неподвижную опору, служат осями качаний О. м. Подвижный нож перемещают вверх или вниз до тех пор, пока периоды колебаний О. м. вокруг каждой из осей не совпадут. Расстояние  $O_1O_2 = l$  между осями измеряют с помощью вешёвской нити на пластину пикалы с нулевым. Тогда по свойствам физ. маятника  $O_2$  будет для  $O_1$  центром качаний, и наоборот, а период малых колебаний О. м. будет при этом равен  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ . Зная значения  $T$  и  $l$  из опыта, можно по данной ф-ле вычислить  $g$ . О. м. позволяет определить величину  $g$  со значительно более высокой степенью точности, чем матем. маятник.

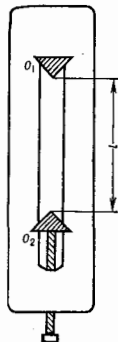


Схема оборотного маятника.

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ** — см. Анализ данных.

**ОБРАТИМОСТИ ТЕОРЕМА** (принцип обратности хода лучей света) — одно из осн. положений геометрической оптики, согласно к-рому путь элементарного светового потока, распространяющегося в оптич. средах 1, 2, 3... по лучу ABCD..., заменяется на прямо противоположный путь DCBA, если свет исходит в направлении, противоположном первоначальному. О. т. широко используется, в частности, при расчёте оптич. систем и построении изображений оптических, даваемых такими системами.

О. т. в простейшем исполнении является следствием Снеллиа закона преломления света, применяемого к двум любым расположенным одна за другой средам из последовательности 1, 2, 3...:  $\sin i_1/\sin i_2 = -n_2/n_1 = n_{12}$ , где  $n_{12}$  — относит. показатель преломления,  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления в второй и первой средах,  $i_1$  — угол падения луча света на границу раздела сред,  $i_2$  — угол преломления во вторую среду. При замене  $i_1$  на  $i_2$  (и наоборот) значения углов остаются неизменными, т. к. неизменны  $n_1$  и  $n_2$ . Аналогичное положение справедливо и при отражении света, поэтому О. т. можно пользоваться в любой (как линзовой, так и зеркальной) оптич. системе.

О. т. предполагает, что ослабление луча света при его прохождении через оптич. среды не зависит от замены направления луча на противоположный. Это следует из обратности Френеля формул относительно направления света.

О. т. применима и для системы, состоящих из сред с плавно изменяющимися значениями  $n$ . В средах, для к-рых характерна оптич. анизотропия, а также при высоких интенсивностях световых потоков (лазерное излучение) вопрос о применимости О. т. усложняется см. *Обращение голового фронта*.

Лит.: Тудоровский А. Я., Теория оптических приборов, 2 изд., ч. 1, М.—Л., 1948; Ландсберг Г. С., Оптика, 5 изд., М., 1976. Г. Г. Савосарец.

**ОБРАТНЫЙ ПРОЦЕСС** в термодинамике — процесс перехода термодинамич. системы из одного состояния в другое, к-рый может протекать как в прямом, так и в обратном направлении через те же промежуточные состояния. О. п. должен протекать столь медленно, чтобы его можно было рассматривать как непрерывный ряд равновесных состояний. Это означает, что процесс должен быть медленным по сравнению с процессами установления термодинамич. равновесия в данной системе. Строго говоря, О. п. характеризуется бесконечно медленным изменением термодинамич. параметров (плотности, давления, темп-ры и др.), определяющих равновесие системы. Такие процессы наз. также квазистатическими или квазиравновесными.

Обратности квазиравновесного процесса следует из того, что любое промежуточное состояние есть состояние термодинамич. равновесия и не чувствительно к тому, идёт ли процесс в прямом или обратном направлении. Т. о., квазистатичность изменения термодинамич. параметров есть достаточное условие обратности термодинамич. процесса.

О. п. — одно из осн. понятий равновесной макроскопич. термодинамики. Действительно, *первое начало термодинамики* формулируется для О. п. в виде равенства  $di = \delta Q + \delta A$  между бесконечно малым приращением энергии  $di$  и суммой подведённого тепла  $\delta Q$  и элементарной работы  $\delta A$ , совершаемой над системой при квазистатич. процессе, а *второе начало термодинамики* — в виде равенства  $dS = \delta Q/T$  между дифференциалом энтропии  $dS$  и отношением  $\delta Q$  к темп-ре  $T$  в абс. шкале, что справедливо для О. п. Для *необратимого процесса* второе начало формулируется в виде неравенства  $dS > \delta Q/T$ , ограничивающего возможные направления процесса.

Все процессы в природе протекают с конечной скоростью и сопровождаются явлениями трения или теплопроводности, поэтому они необратимы. О. п. — идеализация реальных процессов, протекающих так медленно, что необратимыми явлениями можно пренебречь. Иногда быстрые процессы можно рассматривать приближённо как квазиравновесные, если равновесие успевают установиться во всей системе, а в её малых элементах объёма, и *производством энтропии* можно пренебречь (напр., распространение звука в приближении идеальной гидродинамики).

Микроскопич. теорию О. п. изучают в *статистической физике*, где рассматривают малые квазистатич. возмущения распределения Гиббса при медленном изменении внеш. параметров.

Лит. см. при ст. *Термодинамика*.

Д. Н. Зубарев

**ОБРАТНАЯ ВОЛНА** — волна с противоположно направленными фазовой и групповой скоростями. Впервые термин «О. в.» введён в ВЧ-электронике, где на взаимодействии О. в. с электронными пучками основано действие широкого класса СВЧ-приборов — *ламп обратной волны*. Волны с подобными свойствами известны также в пространственно-периодич. структурах и средах.

Простейшими примерами О. в. являются системы с плоскими волнами, в частности в линиях передачи, где распространение волн возможно только вдоль к.-л. определённого направления. В однородных линиях передачи для гармонич. процессов  $\text{Re exp } i(\omega t - kz)$ , когда фазовая скорость равна  $v_\phi = \omega/k$ , а

групповая скорость  $v_{gr} = d\omega/dk$ , существует О. в. при

$$\frac{k}{\omega} \frac{d\omega}{dk} < 0. \quad (*)$$

Здесь  $\omega = \omega(k)$  — дисперсионная характеристика (см. *Дисперсия волн*),  $k$  — волновое число.

По существу  $v_{gr}$  является скоростью перемещения волнового пакета — набора гармонич. волн с частотами  $\omega \in [\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega]$  из узкого интервала  $\Delta\omega/\omega_0 \ll 1$ , так что поток энергии  $S$  и её поперечная плотность  $W$  связаны соотношением  $S = W v_{gr}$ . Поскольку  $W$  всегда говорит, положительна, то в О. в. направление переноса энергии противоположно направлению перемещения фаз.

Условие (\*), согласно к-рому  $(\omega/v_\phi)(d(v_\phi/d\omega)) > 1$ , может выполняться только в системах с т. н. аномальной дисперсией, когда  $(\omega/v_\phi)(d(v_\phi/d\omega)) > 0$ . На рис. 1 приведено несколько примеров дисперсионных характеристик: для волн в волноводов с замагниченной плазмой (1) и в волноводах, частично заполненных изотропной плазмой (2), для быстрых циклотронных волн в потоках заряж. магн., направленных магн. полем (3).

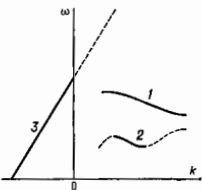


Рис. 1. Дисперсионные характеристики обратных волн (сплошные линии); пунктирные линии соответствуют прямым волнам.

В периодич. структурах, когда волновые процессы можно представить в виде набора (ряд Флоке) пространств. гармоник

$$\text{Re exp } i(\omega t - k_0 z - (2\pi/D)nz), \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots,$$

где  $D$  — период, обратными являются гармоники с  $n < -(k_0 D/2\pi)$ , поскольку направление их фазовых скоростей противоположно направлению потока энергии волны. При синхронном взаимодействии одной из таких пространств. гармоник с к.-л. др. волнами, потоками частиц или просто периодически расположенными излучателями термин «О. в.» относится и к волне в целом, если вклад остальных гармоник в энергообмен неустойчив.

Напр., для печки связанных магнитков дисперсионная характеристика состоит из отд. ветвей (рис. 2), к-рые в области  $k < 0$  соответствуют обратным гармоникам, т. е. их фазовые скорости отрицательны, а направление групповой скорости, общей для всех пространств. гармоник, положительно. В фильтре высоких частот (рис. 3, а) О. в., в отличие от предыдущего, является и осн. гармоника, расположенная в интервале  $-\pi/D < k < \pi/D$ .

Как известно, в потоках частиц, в линиях передач с активными элементами и вообще в неравновесных средах возможно распространение волновых возмущений с т. н. отрицательной «севдоэнергией», т. е. волн, возбуждение к-рых приводит к уменьшению энергии системы. Если такая волна обратная,  $(k/\omega)(d\omega/dk) < 0$ , то направление переноса энергии в ней будет совпадать с направлением фазовой, а не групповой скорости. О. в. с положительной и отрицательной энергиями приводят к разл. эффектам при синхронном взаимодействии их с обычными прямыми,  $(k/\omega)(d\omega/dk) > 0$ , волнами. Если в первом случае возникает полоса зашорения (рис. 4, а), т. е. область частот  $\Delta\omega_c$ , где  $\text{Im } k \neq 0$  даже при отсутствии тепловых потерь, то во втором — система становится абсолютно неустойчивой и амплитуды обеих взаимодействующих волн в полосе  $\Delta k_n$  (рис. 4, б) нарастают во времени экспоненциально; причём в волне с отрицат. «севдоэнергией» это происходит за счёт уменьшения энергии, а в волне с положит. энергией — соответственно за счёт её увеличения.

В однородной и изотропной среде групповая скорость  $v_{gr}$  и волновой вектор  $k$ , определяющий перемещение фаз  $\exp i(\omega t - kx)$ , могут быть только параллельными (прямые волны) или антипараллельными (О. в.). Интересным примером О. в. являются плоские эл-

Рис. 2. Дисперсионная характеристика волн, распространяющихся в плочке уругосвязанных маятников. Левая ветвь ( $k < 0$ ) соответствует обратной пространственной гармонике.

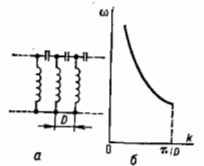
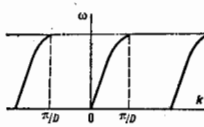


Рис. 3. Электрическая схема фильтра высоких частот (а) и дисперсионная характеристика распространяющейся в нём волны с отрицательной групповой скоростью  $v_{gr} < 0$  (б).

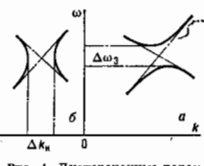


Рис. 4. Дисперсионные характеристики связанных прямой и обратной волн: обе волны с положительной энергией (а), одна из волн с положительной, а другая с отрицательной энергиями (б).

маги. волны в «экзотической» среде с электрич. и магн. проницаемостями  $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$ , осуществимой в принципе с помощью искусств. рассеивателей. В акустической же среде понятия прямых и О. в. строго применимы лишь к вполне определённым направлениям, связанным с гл. осями тензора восприимчивости или деформации.

Лит.: Бриллиуэн Л., Пароди М., Распространение волн в периодических структурах, пер. с франц., М., 1959; Силян Р. А., Сазонов В. П., Замедленные системы, М., 1966; Веселаго В. Г., Электродинамика веществ с отрицательно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ , «УФН», 1967, т. 52, с. 517.

**ОБРАТНАЯ РЕШЕТКА** — периодич. решётка в обратном пространстве, элементарные векторы трансляции  $k$ -рой  $b_i$  связаны с осн. векторами трансляции  $a_i$  исходной Браве решётки (прямой решётки) условиями

$$b_i a_j = \begin{cases} 2\pi, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (1)$$

Узлы О. р. задаются соотношениями  $G = \sum L_i b_i$ ,

где  $L_i$  — произвольные целые числа,  $i = 1, 2, 3$  для трёхмерной решётки,  $i = 1, 2$  для двухмерной. Размерность О. р. совпадает с размерностью прямой решётки. Так, для трёхмерной прямой решётки О. р. является трёхмерной с элементарными векторами трансляции, равными в соответствии с (1):

$$b_1 = 2\pi[a_2 a_3]/V; \quad b_2 = 2\pi[a_3 a_1]/V; \quad b_3 = 2\pi[a_1 a_2]/V. \quad (2)$$

Здесь  $V = (a_1 [a_2 a_3])$  — объём элементарной ячейки прямой решётки; объём элементарной ячейки О. р. равен  $(2\pi)^3/V$ . Вектор О. р.  $G_{hkl} = hb_1 + kb_2 + lb_3$  перпендикулярен плоскости с индексами кристаллографическими  $h, k, l$ .

Между прямыми и О. р. имеется взаимно однозначное соответствие, причём прямая решётка является обратной к обратной. Поэтому для каждого кристалла О. р. вводится однозначно, а симметрия О. р. полностью определяется симметрией решётки Браве кристалла. Напр., О. р. для простой кубич. решётки — простая кубическая, для гранецентр. кубической — объёмно-центрир. кубическая (я наоборот) и т. д.

Понятие О. р. является одним из основных в физике твёрдого тела. О. р. определяет структуру простран-

ств на квазимпульсов *квазичастиц*. Их волновые векторы определены с точностью до векторов трансляции О. р.  $G$ ; состояния квазичастиц, для которых квазимпульсы отличаются на величину  $hG$ , а остальные квазиэнергетические числа одинаковы, тождественны. Поэтому область всех физически неэквивалентных значений волнового вектора квазичастицы образует элементарную ячейку О. р. Соответственно энергетич. спектр квазичастиц и др. ф-ции волнового вектора являются периодич. ф-циями векторов трансляции О. р. При этом мн. характеристики квазичастиц кристалла могут задаваться разложением в ряд Фурье по векторам трансляции О. р. Это позволяет перейти к квазимпульсовому представлению для операторов и волновых ф-ций квазичастиц по аналогии с переходом к импульсовому представлению для частиц в свободном пространстве (см. *Импульсное представление в квантовой механике*).

Экстремумы энергетич. спектра обычно соответствуют точкам высокой симметрии ячеек О. р. При столкновениях квазичастиц сумма их квазимпульсов сохраняется с точностью до  $G$  (см. *Переходные процессы*). Визнера — Зейтца ячейка О. р. является первой Бриллюэновской зоной для кристалла.

О. р. — важный матем. образ, наглядный многочисл. применения в кристаллографии и физике твёрдого тела. Напр., понятие О. р. удобно использовать при описании дифракции частиц на кристаллич. решётке (см. *Дифракция нейтронов, Нейтронография структурная, Рентгеновский структурный анализ, Электронография*). Соответственно нейтронно- и рентгенограммы кристалла могут дать изображение О. р.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Статистическая физика, ч. 1, 3 изд., М., 1976; Современная кристаллография, т. 1, М., 1979. А. З. Мейерович

**ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ** — воздействие результатов к.-л. процесса на его протекание; самовоздействие, взаимовлияние разл. степеней свободы *динамической системы*. Если нач. отклонение к.-л. характеристики процесса от её исходного значения приводит благодаря действию О. с. к дальнейшему росту этого отклонения, то О. с. наз. *положительной*, а в противоположном случае — *отрицательной*.

Термин «О. с.» первоначально появился в радиоэлектронике, где им обозначалась электрч. воздействие анодной цепи лампового усилителя на цепь сетки усиливающей лампы (см. *Генератор электромагнитных колебаний*). Впоследствии этот термин использовался для обозначения воздействия управляемого процесса на орган управления автоматич. регулирования, а также для обозначения эффектов взаимовлияния хим. и тепловой степеней свободы системы в теории теплового взрыва. При разработке теории нелинейных колебаний понятие О. с. применялось Л. И. Мандельштамом, А. А. Андроновым и др. для общей характеристики особенностей нелинейного взаимодействия разл. степеней свободы динамич. систем. Термин «О. с.» широко использовался по отношению к любым эффектам самовоздействия в физ., хим., биол., социологич. и др. системах, осуществляемым либо с помощью внеш. цепи, либо в силу природы их внутр. устройства.

Простейшим примером системы с положительной О. с. является усилитель с громкоговорителем, звуковой сигнал к-рого воздействует на микрофон, подключённый к входу усилителя. Хорошо известный эффект самовозбуждения такой системы обусловлен О. с., реализуемой по акустич. каналу. Аналогично положительная О. с. по оптич. каналу осуществляется с помощью телекамеры, установленной против экрана телевизора, на вход к-рого через усилитель подается сигнал с телекамеры (рис. 1). Результатом самовозбуждения в такой системе являются спонтанно возникающие узоры на экране телевизора.

В качестве примера устройств с отрицательной О. с. можно привести разл. системы автоматич. регулирования. Так, механич. отрицательная О. с. имеется в цент-

робежном регуляторе Уатта, используемом для стабилизации скорости вращения вала паровой машины. Исследование Дж. К. Максвеллом (J. C. Maxwell) и И. А. Вышнеградским свойств такого регулятора положило начало теории О. с. В стабилизаторе напряжения

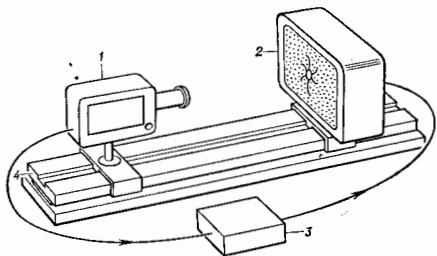


Рис. 1. Блок-схема электрооптической системы с обратной связью: 1 — телерама; 2 — монитор; 3 — усилитель в цепи обратной связи; 4 — оптическая связь.

в результате электрич. отрицательной О. с. происходит увеличение (или уменьшение) напряжения, вызывающее соответственное увеличение (или уменьшение) его внутр. сопротивления. По аналогичному принципу сконструирована автоматич. регулировка усиления в радиоприёмниках и ряде др. устройств.

Системы с О. с. часто представляют в виде схемы, на к-рой сигнал с выхода усилителя поступает на его вход (рис. 2). В общем случае блок «усилитель» на схеме понимается как устройство, осуществляющее по известному закону преобразование входного сигнала  $z$  в выходной сигнал  $X$ . Преобразование сигнала О. с.  $x \rightarrow X$  по известному или заданному алгоритму происходит в цепи О. с.

Для полного теоретич. описания системы, изображённой на рис. 2, необходимо также задать правило отщепления сигнала  $x$  в цепь О. с. от общего сигнала  $Z$

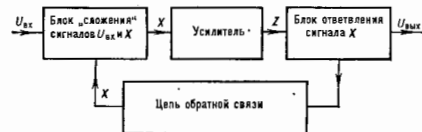


Рис. 2. Блок-схема системы с обратной связью.

на выходе усилителя и закон «сложения» сигнала  $X$  с входным сигналом  $U_{вх}$  на входе усилителя. Важной характеристикой О. с. при этом является коэф. передачи  $\beta$  по каналу О. с., к-рый показывает долю выходного сигнала, передаваемого на вход усилителя,  $X = \beta Z$ . В устройствах автоматич. регулирования в цепь О. с. отщепляется «сигнал ошибки», т. е. разности сигнала на выходе усилителя и нек-рого эталонного сигнала  $U_0$ . Соответственно, закон «сложения» сигналов на входе усилителя может иметь как простейший вид  $z = U_{вх} + X$ , так и более сложный, учитывающий, напр., фазовые соотношения между сигналами переменного тока. Задачей теории О. с. является описание поведения системы с разл. законами преобразования  $x \rightarrow Z$ ,  $Z \rightarrow x$ ,  $x \rightarrow X$ ,  $(X, U_{вх}) \rightarrow z$ , к-рые могут иметь характер алгебраич. действий, дифференцирования, интегрирования и т. п.

В радиоэлектронике используются термин «запаздывающая О. с.» для цепей О. с., содержащих лишь задержки. Если цепь О. с. по переменному току содержит

фазосдвигающие элементы, то О. с. наз. комплексной. В нелинейной оптике и нек-рых др. дисциплинах вместо термина «запаздывающая О. с.» используют термин «инерционное самовоздействие» или «инерционная нелинейность». В теории автоматич. регулирования употребляют термин «непрерывная О. с.», если сигнал О. с. подаётся на вход системы в течение всего процесса управления, или «прерывистая О. с.», если сигнал по цепи О. с. поступает периодически (или по заданной программе). О. с., охватывающая всю систему управления в целом, наз. полной, для О. с., замыкающейся в отд. части системы, используются термин «локальная О. с.». В биологии О. с. характеризуют по механизму её реализации (напр., кинетич. О. с. или биохим. О. с.), а также по функциональному назначению соответствующей цепи (О. с. для регуляции метаболич. процессов, О. с. в цепи гормональной регуляции и т. п.).

В связи с чрезвычайно общим, междисциплинарным характером понятия «О. с.» его дальнейшую детализацию удобно проводить, отрываясь от числа степеней свободы и типа преобразования сигналов в модели, изображённой на рис. 2.

О. с. в сосредоточенных системах осуществляется посредством зависимости скоростей  $dx_i/dt$  от значений самих величин  $x_i$ , характеризующих процесс в данный момент времени. Теоретически такая связь описывается системой обыкновенных дифференц. ур-ний:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, \dots, x_n), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $f_i$  — нек-рые функции, в общем случае — нелинейные;  $n$  — размерность фазового пространства.

Величины  $x_i$  оказывают воздействие на величины скоростей  $dx_i/dt$ , а скорости  $dx_i/dt$  в свою очередь инерционным образом влияют на величины  $x_i$ , определяя их ирражение  $dx_i$  за интервал времени  $dt$ . В результате осуществляется самовоздействие — величины  $x_i$  оказывают влияние на самих себя.

Важнейшим элементом анализа системы (1) является исследование *бифуркации* стационарных решений при изменении параметров задачи и соответствующих изменений фазового портрета системы (см. *Нелинейные колебания и волны*).

Наглядным примером влияния О. с. на динамику системы с  $n = 1$  может служить теория тлеющего взрыва. В этой теории скорость изменения темп-ры  $dT/dt$  определяется конкуренцией экзотермического химической реакции  $Q_n = W \exp(-T_0/T)$  и теплопотерь  $Q_n = \eta(T - T_n)$ :

$$\frac{dT}{dt} = W \exp(-T_0/T) - \eta(T - T_n). \quad (2)$$

Здесь  $T_0$  — энергия активации реакции,  $T_n$  — темп-ра окружающей среды,  $W$  и  $\eta$  характеризуют соответственно тепловой эффект реакции и интенсивность теплообмена. В теории имеется два существенных параметра:  $p = W/(\eta T_0)$  и  $\Phi_n = T_n/T_0$ , причём величина  $p$  играет роль коэф. передачи по каналу О. с. Стационарная темп-ра  $\Phi = T/T_0$  в соответствии с (2) определяется из ур-ния

$$\exp(-1/\Phi) = (\Phi - \Phi_n)/p. \quad (3)$$

На рис. 3 (диаграмма Семёнова) изображены графики левой и правой частей ур-ния (3), к-рые характеризуют соотношение между энерговыделением и теплоотдачей. Видно, что при  $p < p_1$  или  $p > p_2$  уравнение (3) имеет единственное решение, в то время как при  $p_1 < p < p_2$  — *стационарные составные* системы три. Из них два крайних (высоко- и низкотемпературное) устойчивы, а сред-

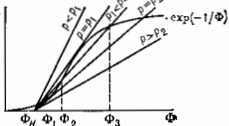
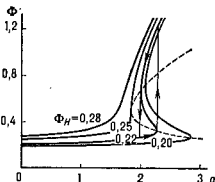


Рис. 3. Диаграмма Семёнова.

нее (тем-ра воспламенения) неустойчиво. При малом превышении этой тем-ры энергоделиение превышает тепловодот, что ведёт к увеличению скорости реакции и её дальнейшему лавинообразному ускорению (тепловой взрыв). Мл. процессы (взрыв, воспламенение, электрич. пробой и т. д.) являются следствием положительной О. с. в системе (см. *Термодинамика неравновесных процессов*).

Как следует из (3), при плавном изменении коэф. передачи стационарная тем-ра может изменяться гистерезисным образом (рис. 4). Явление, для к-рого характерно существование в системе двух устойчивых стационарных состояний, наз. бистабильностью. Би-

Рис. 4. Зависимость стационарной температуры  $\Phi$  от параметра  $p$ . Пунктиром обозначена спинополь — кривая, проходящая через точки, где  $\Phi(p)$  имеет вертикальную касательную. Для кривой  $\Phi_{00} = 0,22$  стрелками показана петля гистерезиса.



стабильность даёт возможность скачкообразных изменений состояния системы при непрерывном изменении соответствующего параметра, напр. коэф. передачи по каналу О. с. Теория скачкообразных изменений при непрерывном изменении параметра составляет предмет *катастроф теории*. Отображение гладкой поверхности  $\Phi$  на плоскость параметров  $p$  и  $\Phi_0$  характеризуется особенностью, называемой особенностью типа сборки (рис. 5). Отвечающая этой особенности бифуркац. граница  $p = y^2 \exp(1/y)$ ,  $y = (1 \pm \sqrt{1 + 4\Phi_0})/2$ , разделяет на плоскости параметров  $(p, \Phi_0)$  области, в к-рых ур-ние (3) имеет одно или три стационарных состояния.

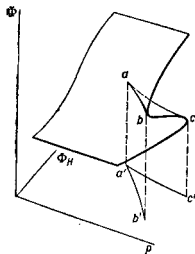


Рис. 5. Катастрофа сборки, характерная для задач теории теплового взрыва.

К тем же выводам можно прийти, рассматривая необратимый на рис. 2 усилитель, к-рый в отсутствие О. с. характеризуется нелинейной передаточной ф-цией  $Z = f(z)$ . В установившемся режиме величина сигнала  $z$  на входе усилителя определяется на ур-ния

$$U_{вх} + \beta f(z) = z, \quad (4)$$

где  $\beta$  — коэф. передачи по каналу О. с. Для нелинейной характеристики вида  $f(z) = A \exp(-U_0/z)$  ур-ние (4) сводится к (3) простым переобозначением переменных. Если же усилитель без О. с. характеризуется линейным коэф. усиления  $K_0/f(z) = K_0/2$ , то из (4) определяется коэф. усиления  $K$  усилителя с О. с.:  $K = K_0/(1 - \beta K_0)$ . Случай  $\beta K_0 = 1$  соответствует потере устойчивости и возможности самовозбуждения усилителя.

Для нелинейного усилителя, описываемого ур-нием (4), аналогом рис. 4 является  $N$ -образная вольт-амперная характеристика, содержащая нападющий участок. В ряде устройств полупроводниковой электроники (*Ганна диод, туннельный диод* и др.) аналогичный  $N$ -образный вид вольт-амперной характеристики реализуется благодаря положительной О. с., возникающей

при разогрете алектродов в зонах проводимости (см. *Горазе электроды*).

Эффекты бистабильности (или мультистабильности), соответствующие скачки и гистерезисные явления характерны для мл. систем с положительной О. с. Напр., рис. 4 имеет качественно тот же вид, что и  $V - T$  диаграмма, описываемая ур-нем Ван-Дер-Ваальса; т. о., бистабильные системы ведут себя подобно системам с фазовым переходом (см. *Синергетика*).

В механич. системах примером бистабильности является скачкообразное изменение прогиба упругой пластинки под действием приложенной нагрузки. В оптич. системах важную роль играет бистабильность интенсивности когерентного света в резонаторе Фабри — Перо с насыщающимся поглотителем. Эффекты бистабильности можно наблюдать при лазерном нагреве среды с обратной хм. реакцией  $A \rightleftharpoons B$  в случае, когда свет селективно поглощается одним из реагентов.

В каждом из перечисленных примеров можно выделить свой механизм формирования О. с. Напр., при лазерном нагреве химически активная О. с. обусловлена зависимостью констант скоростей реакций от тем-ры и изменением поглощения света при изменении концентрации реагентов.

Новые динамич. свойства систем с О. с. возникают при увеличении числа степеней свободы. Так, для систем, описываемых двумя ур-ниями (1), на фазовой плоскости наряду с особыми точками — состояниями равновесия, могут также возникать особые траектории — предельные циклы, отвечающие *автоколебаниям*. Примером механич. системы с автоколебаниями являются часы с анкерным устройством, к-рое осуществляет О. с. между источником энергии (пружинной, гирей) и маятником.

Автоколебания — общее свойство нелинейных систем с положительной О. с. Колебания в газовом разряде, вызывающие мерцание неоновой рекламы, и самопроизвольное завывание водопроводной трубы при открывании крана, флаттер самолётов и звучание духовых и смычковых музыкальных инструментов с позиций теории отличают лишь физ. механизмы формирования О. с. между разл. степенями свободы соответствующих систем и конкретные виды нелинейности.

В биол. системах важную роль играет О. с., ответственная за возникновение биоритмов и др. периодич. процессов, напр. дыхания и сердцебиения (см. *Биофизика*).

В экол. системах хорошо известны периодич. колебания численности нуноулий в сообществах типа «хищник — жертва». О. с. здесь осуществляется за счёт увеличения (уменьшения) скорости прироста численности хищников при увеличении (уменьшении) числа жертв, являющихся для них пищей.

В теории сосредоточенных систем с большим числом степеней свободы важную роль играет то обстоятельство, что динамич. переменные, как правило, изменяются с разными скоростями. Напр., в системе, описываемой ур-нием

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2), \quad \varepsilon \frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2), \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — малый параметр, а  $f_1$  и  $f_2$  — одного порядка,  $x_1$  является «медленной», а  $x_2$  «быстрой» переменной. Эволюция такой системы на фазовой плоскости происходит след. образом. Из нач. состояния система «быстро» релаксирует к нуль-изоклине  $x_2 = g(x_1)$ , определяемой из ур-ния  $f_2(x_1, x_2) = 0$ , а затем «медленно» релаксирует вдоль этой нуль-изоклины к устойчивому состоянию равновесия. Это означает, что осн. время системы пребывает вблизи траектории  $x_2 = g(x_1)$ , т. е. перемещая  $x_2$  «подчинена» переменной  $x_1$ . Утверждение составляет содержание принципа подчинения, в силу к-рого дифференц. связ., задаваемая вторым ур-нием (5), может быть заменена на алгебраич. связ. между пере-

менными  $x_2$  и  $x_1$ . Такое приближение, наз. адиабатическим, позволяет уменьшить число степеней свободы системы и тем самым упростить исходную задачу. Вследствие принципа подчинения поведение системы в целом определяется законом эволюции медленной переменной, к-рую в этом случае называют параметром порядка. Особое значение имеет то обстоятельство, что принцип подчинения наиб. ярко проявляется в точках бифуркации, где поведение системы определяется только параметрами порядка (см. Гинзбург — Ландау теория).

В силу принципа подчинения динамика, особенности системы (5) могут быть определены непосредственно

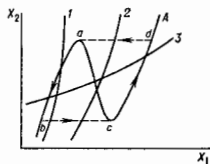


Рис. 6.  $N$ -образная нуль-изогиа «быстрой» переменной (А), пересекающаяся с монотонной нуль-изогиальной «медленной» переменной. Различные случаи отрывают ведущую (1), автоколебательную (2) и триггерную (3) режимы.

по форме и взаимному расположению её нуль-изогиин. Если, напр., нуль-изогиа ур-ния для быстрой переменной имеет  $N$ - или  $H$ -образный вид (рис. 6), то в зависимости от характера её пересечения с нуль-изогиальной ур-ния для медленной переменной можно выделить случаи, отвечающие следующему, автоколебательному и триггерному режимам. В автоколеб. режиме единств. состояние равновесия (точка пересечения нуль-изогиин) неустойчиво и система движется вдоль предельного цикла, состоящего из участков  $ab$  и  $cd$  медленных движений и быстрых скачкообразных движений на участках  $bc$  и  $da$ . Строгое обоснование правдивости теории траекторий быстрых и медленных движений даёт теория асимптотич. разложенных решений обыкновенных дифференциальных ур-ний, содержащих малый параметр при старшей производной.

С ростом числа степеней свободы усложнение динамич. системы, напр. при изменении коэф. передачи по каналу  $O. c.$ , может осуществляться за счёт бифуркации периодич. движений, приводящих, в частности, к рождению странного аттрактора. Поведение фазовых траекторий на таком аттракторе и vicinity него хаотично, поэтому с рождением странного аттрактора связывают возникновение в системах хаотич. движения (см. Стохастические колебания).

Такое хаотич. движение может демонстрировать уже система, состоящая всего из трёх ур-ний типа (1) (см. Лоренца система).

Аналогичное усложнение динамики системы наблюдается при наличии запаздывания в цепи  $O. c.$ , когда простейших нелинейностей достаточно для того, чтобы, изменяя коэф. передачи по каналу  $O. c.$ , реализовать множество динамич. режимов: от простейших колебаний до хаоса.

$O. c.$  в системах с распределёнными параметрами носит нелокальный характер, т. е. взаимовлияние осуществляется между величинами, расположенными в разных точках пространства. Во многих физ. и хим. системах такое взаимовлияние обусловлено процессами необратимого переноса типа диффузии. В этих системах нелокальная  $O. c.$  теоретически описывается системой ур-ний в частных производных:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \nabla(D_{ij}\nabla u_j) + f_i(u_1, \dots, u_n) \quad (6)$$

$$(i = 1, \dots, n),$$

где  $D_{ij}$  — матрица коэф. диффузии, в общем случае величина и недиагональная,  $u_i$  — переменная, описывающая поведение системы.

В случае одномерной и однокомпонентной среды с постоянной диффузией ( $D_{ij} = D = \text{const}$ ) ур-ние (6) принимает вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(u). \quad (7)$$

Если  $f(u)$  имеет  $N$ -образный вид, то ур-ние (7) описывает движение стационарной волны переключения (см. Автоволны). Матем. образом такой волны на фазовой плоскости ( $u_1 = u$  и  $u_2 = u_t$ ), является сепаратриса, соединяющая два устойчивых стационарных состояния  $u_1 = u_1(-\infty)$  и  $u_1 = u_1(\infty)$ . Модель (7) характерна для мн. задач физики горения, биологии, экологии и т. д. Она рассматривалась в 30-е гг. А. Н. Колмогоровым, П. Г. Петровским, Н. С. Пискуновым (распространение эпидемий) и Я. В. Зельдовичем и Д. А. Франк-Каменецким (волна горения). Причиной нетривиального поведения системы типа (7) является положительная  $O. c.$ , формирующаяся между потоком  $j = -D \partial u / \partial x$  и самой величиной  $u$ . Для стационарной волны переключения такое самовоздействие осуществляется по схеме

$$j \partial j / \partial u = \Psi(j, u).$$

В многокомпонентных ( $n > 1$ ) системах ур-ния (6) описывают  $O. c.$  между разл. потоками  $j_k$ . Наличие  $O. c.$  между потоками vicinity положений равновесия в термодинамике впервые отмечено Л. Онсагером (см. Онсагера теорема).

С помощью моделей одномерных двухкомпонентных ( $n = 2$ ) систем с постоянной диагональной диффузией

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = D_{11} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + f_1(u_1, u_2),$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = D_{22} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + f_2(u_1, u_2)$$

удаётся описать такие явления, как распространение нервного импульса [А. Л. Ходжкин (A. L. Hodgkin), А. Ф. Хансли (A. F. Huxley), 1952], формирование стационарных неоднородных структур [А. М. Тьюринг (A. M. Turing), 1952; см. Диссипативные структуры], автоколеб. процессы в реакциях Белоусова — Жаботинского и т. д. Ур-ния (8) описывают системы, в к-рых формируются  $O. c.$  между скоростями  $\partial u_i / \partial t$ , потоками  $\partial u_i / \partial x$  и самими величинами  $u_i$ . На языке теории нелинейных волн такие  $O. c.$  приводят к эффектам синхронизации и конкуренции мод, что в свою очередь влечёт за собой разл. явления самоорганизации.

Для достаточно «быстрых» величин, когда времена релаксации  $\tau$  различных физ. величин, от к-рых зависит  $\tau$ , составимым с обратной частотой световой волны  $\omega^{-1}$ , самовоздействие света приводит к разл. эффектам генерации гармоник, вынужденному рассеянию света и др. Максимальный коэф. передачи по каналу положительной  $O. c.$  в этих случаях обеспечивается при выполнении условий резонансной связи мод (условий фазового синхронизма).

Др. примером самодействия являются эффекты типа самофокусировки и самодефокусировки излучения, обусловленные деформацией фазового фронта распространяющейся волны. Напр., в среде с показателем преломления  $n$ , зависящим от интенсивности световой волны  $n = n_0 + n_2 E^2$  (безымп. нелинейность), положительная  $O. c.$  формируется за счёт отклонения лучей в область большего показателя преломления, что в свою очередь приводит к росту показателя преломления за счёт роста интенсивности света, фокусируемого такой нелинейной линзой. Если коэф. передачи по каналу такой положительной  $O. c.$  превышает коэф. передачи по каналу отрицательной  $O. c.$ , связанной с дифракцией света, то наблюдается эффект самосжатия, «схлопывания» лазерного луча при его распространении через нелинейную среду.

Лит.: Андронов А. А., Витт А. А., Халякин С. В., Теория колебаний, [3 изд.], М., 1981; Франк-Каменецкий Д. А., Диффузия и теплопередача в хими-



ческой кинетике, 3 изд., М., 1987; Николис Г., Пригожин И., Самоорганизация в неравновесных системах, пер. с англ., М., 1979; Физика ХХ века. Развитие и перспективы. Сб. ст., М., 1984; Хакен Г., Синергетика. Иераргия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах, пер. с англ., М., 1985; Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г., Автоволновые процессы, М., 1987; Булик Ф. В., Кириченко И. А., Луцкий Чук В. С., Термодинамическое действие лазерного излучения, «УФН», 1982, т. 138, с. 45; их же, Структуры при лазерном облучении металлов, «УФН», 1981, т. 132, с. 162.

**ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ РАССЕЯНИЯ МЕТОД** — метод исследования нек-рых *нелинейных уравнений математической физики*. Введен К. Гарднером (С. S. Gardner), Дж. Гринном (J. M. Greene), М. Крускалом (M. D. Kruskal) и Р. Миурой (R. M. Miura) в 1967, хотя отд. элементы метода были известны ещё в 49 в. (см. *Беклунда преобразование*). Основан на представлении исследуемого нелинейного ур-ния в виде условия совместности для системы линейных ур-ний. Первонач. вариант метода, использующий теорию рассеяния для дифференц. операторов (отсюда назв. метода), был применён к *Кортвега — де Фриса уравнению*

$$u_t - bu_{xx} + u_{xxx} = 0, \quad (1)$$

к-рое является условием совместности переопределённой линейной системы ур-ний

$$(\hat{L} - \lambda^2)\psi = 0, \quad (2)$$

$$\psi_t + \hat{A}\psi = 0, \quad (3)$$

$\hat{L} = -d^2/dx^2 + u(x, t)$ ,  $\hat{A} = 4d^3/dx^3 + 3u(d/dx + (d/dx)u)$  и эквивалентно операторному соотношению (представлению Лакса)

$$d\hat{L}/dt = [\hat{L}, \hat{A}]. \quad (4)$$

Ур-ние (2) — стационарное одномерное *Шрёдингера уравнение* с потенциалом  $u(x, t)$ , зависящим от времени  $t$  как от параметра [предполагая, что  $u(x, t)$  достаточно быстро убывает при  $x \rightarrow \pm \infty$ ].

Основные понятия. Волновые ф-ции  $\psi$ , соответствующие непрерывному спектру оператора  $\hat{L}$ , определим асимптотич. выражениями

$$\psi \rightarrow e^{-i\lambda x} + r(\lambda, t)e^{-i\lambda x} \quad \text{при } x \rightarrow +\infty,$$

$$\psi \rightarrow a^{-1}(\lambda, t)e^{i\lambda x} \quad \text{при } x \rightarrow -\infty.$$

Из представления (4) следуют соотношения

$$r(\lambda, t) = r(\lambda, 0)e^{i\lambda^2 t}, \quad a(\lambda, t) = a(\lambda, 0), \quad (5)$$

$$r(\lambda, 0) \equiv r(\lambda), \quad a(\lambda, 0) \equiv a(\lambda).$$

Ф-ция  $r(\lambda, t)$  имеет смысл амплитуды рассеяния назад, ф-ция  $a^{-1}(\lambda, t)$  — амплитуды рассеяния вперёд. Ф-ция  $a(\lambda)$  аналитична и имеет на верх. мнимой полусоси конечное число нулей  $\lambda_n = i\kappa_n$ , определяющих дискретный спектр оператора Шрёдингера  $\hat{L}$ . Положение нулей не зависит от времени. Собств. ф-ции дискретного спектра  $\psi_n(x, t)$  определяем нормировкой  $\psi_n \rightarrow \exp(-\kappa_n x)$  при  $x \rightarrow +\infty$ , тогда  $\psi_n \rightarrow c_n(t)\exp(\kappa_n x)$  при  $x \rightarrow -\infty$ . Из фл. (5) следует, что

$$c_n(t) = c_n(0)\exp(8\kappa_n^2 t), \quad c_n(0) \equiv c_n. \quad (6)$$

Рассмотрим интегральное уравнение Гельфанда — Левинтана — Марченко для ф-ции  $K(x, z)$ , позволяющей решить обратную задачу рассеяния:

$$K(x, z) + F(x+z) + \int_{\frac{1}{2}}^{\infty} K(x, s)F(s+z)ds = 0, \quad (7)$$

вдесь

$$F(\xi) = \sum_{n=1}^N M_n^2 e^{-\kappa_n \xi} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r(\lambda) e^{i\lambda \xi} d\lambda,$$

$$M_n^2 = i c_n / (da/d\lambda)_{\lambda=i\kappa_n}$$

При помощи ф-лы  $u(x) = 2dK(x, x)/dx$  можно восстановить потенциал в ур-нии Шрёдингера (2) по набору т. в. данных рассеяния, т. е. величин  $r(\lambda)$ ,  $\kappa_n$ ,  $c_n$ . При физических очевидных предположениях  $|r(\lambda)| < 1$ ,  $M_n^2 > 0$ ,  $\kappa_n > 0$  эта задача однозначно разрешима.

Вместо данных рассеяния можно говорить о функции  $F(\xi)$ .

О. з. р. м. основан на соотношениях (5), (6), определяющих зависимость данных рассеяния от времени и позволяющих решать задачу Коши для ур-ния (1) по схеме

$$u(x) \xrightarrow{1} F(\xi) \xrightarrow{2} F(\xi, t) \xrightarrow{3} u(x, t).$$

На I этапе решается прямая задача рассеяния, на III этапе — обратная. Для эфф. решения этих задач, вообще говоря, необходимы численные расчёты. Достоинство О. з. р. м. состоит в том, что он позволяет сколь угодно далеко продвинуться по времени без потери точности.

При  $r(\lambda) = 0$  ур-ние (7) сводится к системе  $N$  линейных алгебраич. ур-ний и его решение выражается в элементарных ф-циях. Это решение описывает взаимодействие  $N$  уединённых волн (*солитонов*) и наз.  $N$ -солитонным. При любом  $t$  профили  $N$ -солитонных решений представляют собой по отношению к ур-нию Шрёдингера безотражат. потенциалы (потенциалы Баргмана), на к-рых не происходит отражения назад.

Описанный вариант О. з. р. м. можно рассматривать как нелинейный аналог метода разделения переменных при решении задачи Коши для линейных эволюц. ур-ний (напр., *диффузии уравнения*). Этот вариант метода можно использовать также для решений ур-ния Кортвега — де Фриса, убывающих в одном направлении, но иделья убывающих для неубывающих решений. Нек-рые из таких решений можно построить методами алгебраич. геометрии. Профили этих решений — периодич. или квазипериодич. потенциалы, в непрерывном спектре к-рых имеется конечное число  $n$  запрещённых зон (см., напр., *Бриллюэна зона*). Простейший из них (однозонный потенциал) выражается через эллиптические функции и описывает частное решение ур-ния (1) — стационарную периодич. волну. Общее решение ( $n$ -зонный потенциал) описывает взаимодействие  $n$  таких волн. С  $n$ -зонными потенциалами связаны  $\theta$ -функции Якоби, при помощи к-рых можно записать и решения линейной системы (2), (3) — функции Блоха.

**Применение метода.** Описанная схема применима к разл. нелинейным дифференц. и интегро-дифференц. ур-ниям, представимым в виде

$$u_t = f(\hat{A}, t)u_x. \quad (8)$$

Здесь  $f(\xi, t)$  — произвольная рациональная ф-ция переменной  $\xi$ , а  $\hat{A}$  — т. н. рекурсионный оператор:

$$\hat{A}\varphi = \varphi_{xx} - 4u\varphi + 2u_x \int_{\frac{1}{2}}^{\infty} \varphi(y)dy$$

[для ур-ния Кортвега — де Фриса  $f(\xi, t) \equiv \xi$ ]. В частном случае  $f(\xi) = \xi^m$  ур-ния (8) (т. е. выше ур-ния Кортвега — де Фриса) являются дифференциальными и имеют порядок  $(2m+1)$ . Ур-ния (8) являются условиями совместности линейной системы ур-ний, к-рая отличается от системы (2), (3) видом оператора  $\hat{A}$ . Если  $f(\xi, t)$  — полином по переменной  $\xi$ , то  $\hat{A}$  — дифференц. оператор.

Все ур-ния (8) имеют  $n$ -солитонные и конечнотонные решения. Каждое из ур-ний (8) имеет бесконечное число интегралов движения. В качестве интеграла можно

взять любой функционал от сохраняющейся ф-ции  $a(\lambda)$ . Интегралы вида

$$I_p = \text{Im} \int_{-\infty}^{\infty} (\lambda/2)^{2p+1} \text{Im} a(\lambda) d\lambda$$

можно выразить через ф-цию  $u$  и её производные по  $x$ , напр.:

$$I_1 = \int u dx, \quad I_2 = \int u^2 dx, \quad I_3 = \int (u^3 + u_x^2/2) dx.$$

Все ур-ния (8) являются *гамильтоновыми системами*. Однако гамильтонова структура задётся для них неоднозначно. Для задания этой структуры нужно определить скобку Пуассона  $\{\alpha, \beta\}$  между функциями от ф-ции  $u$ . Кроме обычной скобки Пуассона

$$\{\alpha, \beta\} = \int_{-\infty}^{\infty} dx \left[ \frac{\delta \alpha}{\delta u} \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial x} \frac{\delta \beta}{\delta u} \right]$$

можно ввести след. скобку Пуассона

$$\{\alpha, \beta\} = \int_{-\infty}^{\infty} dx \left[ \frac{\delta \alpha}{\delta u} F(\lambda, t) \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial x} \frac{\delta \beta}{\delta u} \right].$$

Здесь  $F(\lambda, t)$  — произвольная рациональная ф-ция переменной  $\lambda$ .

Любая из скобок Пуассона между любыми двумя интегралами движения равна 0. Этот факт тесно связан со свойством полной интегрируемости: нелинейное ур-ие в частных производных (8) распадается на бесконечную систему обыкновенных дифференц. ур-ий.

Дальнейшее расширение класса ур-ий, к к-рым применим О. з. р. м., связано с др. выбором оператора  $\hat{L}$ . В качестве  $\hat{L}$  можно взять оператор 3-го или более высокого порядка. С каждым оператором  $\hat{L}$  связаны свой рекурсивный оператор и своя бесконечная серия ур-ий вида (8). Лишь нек-рые из этих ур-ий имеют физ. применения. Так, оператор 3-го порядка позволяет исследовать возникающее в теории нелинейных волн ур-ие Буссинеска

$$u_{tt} + u_{xx} + u_{xxx} + (u^2)_{xx} = 0.$$

В качестве оператора  $\hat{L}$  можно взять разностные операторы, что позволяет применить О. з. р. м. к дифференциально-разностным ур-иям, среди к-рых особенно интересны ур-ие Вольтерры

$$\dot{N}_k = N_k(N_{k-1} - N_{k+1}),$$

встречающееся в матем. биофизике и теории плазменной турбулентности, а также ур-ие для цепочки Тода

$$\dot{N}_k = \exp(N_{k-1} - N_k) - \exp(N_k - N_{k+1}),$$

описывающее нелинейную модель одномерного кристалла. Оператор  $\hat{L}$  может быть сингулярным интегральным оператором, такие операторы возникают в краевых задачах теории аналитич. ф-ций. Их можно использовать для изучения нелинейных ур-ий, возникающих в теории внутр. волн. Оператор  $\hat{L}$  может быть матричным. Так, для применения О. з. р. м. к *Шредингера уравнению нелинейному* нужно подставить в ур-ие (2) вместо оператора  $\hat{L}$  одномерный оператор Дирака (см. *Дирака уравнение*). При изучении важной для нелинейной оптики задачи о резонансном взаимодействии системы трёх волн с помощью О. з. р. м. в качестве  $\hat{L}$  следует использовать обобщение оператора Дирака.

Обобщения метода. Описанная схема О. з. р. м. допускает разл. обобщения. Зависимость ур-ий, входящих в линейную систему, от спектрального параметра  $\lambda$  может описываться рациональными или эллиптич. ф-циями и даже дифференц. операторами по  $\lambda$ . Условие совместности линейной системы образуют неравнозначный набор нелинейных ур-ий, имеющих, вообще говоря, переменные коэффициенты. Многие из этих

ур-ий находят применение в физике, напр. в нелинейной оптике, теории ферромагнетизма и общей теории относительности. Для отыскания солитонных решений этих ур-ий развиты различные методы, основанные на свойствах аналитич. ф-ций.

Существует неск. вариантов обобщения О. з. р. м. на многомерных случай, однако лишь нек-рые ур-ия используются в физике, напр. *Кабошова — Пеннинского уравнение* и ур-ие дуальности для Янга — Миллса полей. Теория таких ур-ий не завершена.

Развитие О. з. р. м. позволило по-новому взглянуть на теорию конечных интегрируемых систем. В О. з. р. м. можно включить почти все известные системы такого рода. О. з. р. м. стимулировал исследования в разл. областях математики (линейная теория дифференц. операторов, классич. алгебры, геометрия). Результаты этих исследований используются в теории элементарных частиц (релятивистские струны).

Лит.: Теория солитонов. Метод обратной задачи, М., 1980; Джек Дик Введение в теорию солитонов, пер. с англ., М., 1983; Абловиц М., Сигур Х., Солитоны и метод обратной задачи, пер. с англ., М., 1987. В. Е. Захаров.

**ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА** — автоматич. формирование с помощью разл. физ. механизмов и схемных решений т. н. обращённого пучка, в той или иной мере соответствующего обращённой во времени картине распространения падающего (авходящего) пучка. Наб. развитие и осп. перспективы приложений О. в. ф. связаны с лазерными лучами.

На первый взгляд, создание обращённого во времени движения в равной мере может осуществляться и в механике взаимодействующих частей, и в механике сплошной среды, и во всех др. физ. системах, где микроскопич. ур-ия движения ковариантны относительно замены знака времени. Однако для подавляющего большинства физ. систем характерна сильная неустойчивость поведения конкретных микроагрегатов по отношению к малым возмущениям нач. условий. В результате даже чрезвычайно точное обобщённое и мгновенное изменение знака всех обобщённых импульсов создаст картину обращённого движения лишь на небольшом интервале времени, после чего система станет необратимо эволюционировать в направлении роста энтропии (см. *Обращение времени*).

Исключением являются системы с линейными незатухающими колебаниями, а также волны в линейных недиссипативных средах. При распространении светового пучка в линейной поглощающей среде (в общем случае — пространственно неоднородной) сохраняются его энтропия, спектральная темп-ра, яркость и т. п. величины, что указывает на отсутствие неустойчивости и на возможность обращения процесса.

Для монохроматич. световых полей

$$E_{\text{вещ}}(\mathbf{R}, t) = \frac{1}{2} [E(\mathbf{R})e^{-i\omega t} + E^*(\mathbf{R})e^{i\omega t}] \quad (1)$$

систему ур-ий Максвелла в непоглощающей немагн. среде с симметричным веществом тензором диэлектрич. проницаемости  $\epsilon_{ik}(\mathbf{R}) = \epsilon_{ki}(\mathbf{R}) = \epsilon_{ik}^*(\mathbf{R})$  можно свести к линейному ур-ию

$$\text{rot rot } E(\mathbf{R}) - \frac{\omega^2}{c^2} \hat{\epsilon}(\mathbf{R}) E(\mathbf{R}) = 0 \quad (2)$$

для комплексной амплитуды поля  $E(\mathbf{R})$ . Тогда матем. формулировка возможности существования обращённой волны состоит в том, что любому решению ур-ия (2) можно поставить в соответствие ф-цию  $E_2(\mathbf{R}) = CE_1^*(\mathbf{R})$ , к-рая будет решением того же ур-ия (2) при любой комплексной константе  $C = |C|e^{i\phi}$ . Звёздочка означает операцию комплексного сопряжения:

$$E_2(\mathbf{R}) = C[E_1(\mathbf{R})e^{i\phi_0(\mathbf{R})}]^* = C[E_1(\mathbf{R})e^{-i\phi_0(\mathbf{R})}],$$

т. е. изменение знака пространственно зависящей фазы  $\phi$  поля; поэтому в англоязычной научной литерату-

ре для О. в. ф. в оптич. диапазоне принят термин optical phase conjugation — оптич. фазовое сопряжение.

Волновой фронт определяется как поверхность постоянной фазы волны,  $\varphi(R) = \text{const}$ . Поэтому формы волновых фронтов взаимно обратимых волн совпадают.  $\varphi_1(R) = -\varphi_2(R) = \text{const}$ , а направления распространения противоположны (рис. 1), откуда и название — О. в. ф.



Рис. 1. Волновые фронты встречных волн — падающей (1) и отражённой (2) — совпадают.

При прохождении исходной, идеально направленной когерентной волны через среду из прозрачного материала с сильными неоднородностями показателя преломления направленность прошедшей волны во много раз ухудшается (рис. 2, а). Если на ту же среду с противоположной стороны направить волну, точно обратную по отношению к прошедшей через неё (рис. 2, б), то, в силу обратимости законов линейного распространения (см. *Обратимости теорема*), отражённая волна в результате преломления на тех же неоднородностях выпрямится на обратном проходе до идеально

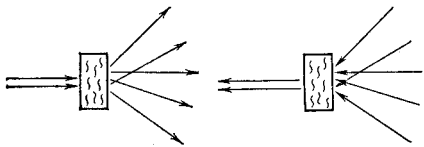


Рис. 2. Прохождение через оптически неоднородную среду: а — идеально направленного пучка, б — обратного к нему.

направленной. Это необычное свойство отражённой волны лежит в основе большинства приложений О. в. ф. (см. ниже).

Наиб. просто обратить плоскую волну. Если известно направление её распространения и, то для обращения достаточно установить плоское зеркало строго перпендикулярно и. Однако сферическую волну плоским зеркалом обратно не удаётся: расходящаяся сферич. волне для обращения должна соответствовать сходящаяся к тому же источнику сферич. волна. Для обращения волна произвольной структуры необходимо иметь зеркало с профилем, в точности совпадающим с профилем волнового фронта, т. е. для каждой волны требовалось бы своё особое зеркало, способное менять свою форму (см. *Адаптивная оптика*).

Методы нелинейной оптики и динамической голографии позволяют реализовать «зеркала», автоматически подстраивающиеся под форму любой падающей волны так, чтобы отразить сигнал в форме обратной волны. Существует ряд методов О. в. ф. с использованием нелинейнооптич. сред. Один из двух наиб. распространённых методов — О. в. ф. при вынужденном рассеянии (ВР) света назад [1] (чаще всего — Мандельштама — Бриллюэна, ВРМБ). В этом случае в нелинейную среду (жидкость, сжатый газ, кристалл, волоконник световод и т. п.) вводится квазимонохроматич. волна от лазера  $E_L(x, y, z)e^{-i\omega t - ikz}$ , к-рую предвременно пропускают через искажающий элемент (линзу, неоднородную фазовую пластинку и т. п.). Его назначение состоит в том, чтобы сделать распределение интенсивности волны  $E_L$  в среде сильно неоднородным как по поперечным  $(x, y)$ , так и по продольным  $(z)$  координатам (рис. 3). Мощность и энергия этой волны должны быть выше порога развития ВРМБ. Порог определяется условием, чтобы очень слабый затравочный сигнал  $I_0(0)$ , появляющийся в результате спонтанного рассеяния,

успелся за счёт ВРМБ на длине среды  $z$  в очень большое число раз:  $I_0(z) = I_0(0)\exp(gz)$  с  $gz \approx G|E_L|^2 \approx 25$ . Здесь  $G$  — константа, характерная для данной среды.

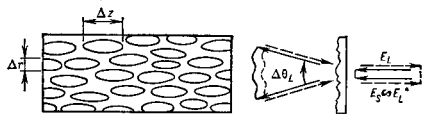


Рис. 3. Схема обращения волнового фронта при вынужденном рассеянии.

инкремент нарастания  $g$  ( $\text{см}^{-1}$ ) для разл. конфигураций рассеянных волн  $E_L(x, y, z)$  в каждом сечении  $z = \text{const}$  определяется интегралом их перекрытия с профилем интенсивности падающей волны  $E_L(x, y, z)$ :

$$g_{\text{эфф}} = \frac{G \int |E_L(x, y, z)|^2 |E_0(x, y, z)|^2 dx dy}{\int |E_L(x, y, z)|^2 dx dy} \quad (3)$$

Наиб. усиление испытывает такая волна  $E_0(x, y)$ , локальные максимумы к-рой всюду и пространстве совпадают с максимумами волны  $E_L(x, y)$ . В процессе распространения из-за дифракции и интерференции каждая из полей  $E_L(x, y, z)$  и  $E_0(x, y, z)$  меняет свою поперечную структуру. Если эти изменения достаточно глубоки, то единств. возможность сохранить во всём объёме согласованность неоднородностей интенсивности при их встречном распространении состоит в том, чтобы рассеянное поле  $E_0(x, y, z)\exp(ikz)$  было сопряжённым к возбуждающему полю  $E_L(x, y, z)\exp(-ikz)$ . В этих условиях интеграл перекрытия (3) для рассеянной волны вида  $E_0(x, y, z) = A(z)E_L^*(x, y, z)$ , т. е. обратной к падающей, оказывается в 1,5–2 раза больше, чем для всех остальных необращённых конфигураций рассеянных волн  $E_0(x, y, z)$ . Из-за огромного общего усиления ( $e^{2z} \approx e^{20} \approx 2 \cdot 10^1$ ) даже относительно небольшое отличие инкремента необращённых конфигураций приводит к практически полной их дискриминации на выходе из среды. Т. о., при выполнении опред. условий [2] срабатывает дискриминац. механизм О. в. ф. при ВРМБ и рассеянная назад волна оказывается обратной коней падающей волны.

Другой широко распространённый метод О. в. ф. основан на четырёхволновом смешении (ЧВС). В нели-

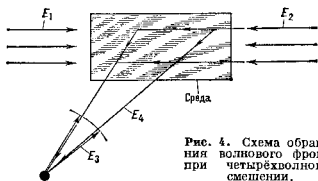


Рис. 4. Схема обращения волнового фронта при четырёхволновом смешении.

нейнооптич. среде одновременно подаются две точно встречные опорные волны  $[E_1 \exp(ikz) + E_2 \exp(-ikz)] \times \exp(-i\omega t)$  и сигнал  $E_3(R) \exp(-i\omega t)$ , подлежащий обращению (рис. 4). Интерференционная картина полей  $E_1$  и  $E_2$  в нелинейной среде записывается в реальном масштабе времени в виде голограммы с пространственной модуляцией диэлектрической проницаемости  $\delta\epsilon(R) \propto E_1 E_2^*(R) \exp(ikz)$ . Эта голограмма тут же считывается с помощью второй опорной волны  $E_4 \exp(-ikz)$  и возбуждается четвёртая волна

$$E_4(R) \propto E_1 E_2^* E_3^*(R),$$

точно обращённая (комплексно-сопряжённая) по отношению к падающему сигналу  $E_2(R)$ . К такому же результату приводит и второй процесс, идущий одновременно и когерентно с первым: запись голографич. рёшеток, пропорциональных  $E_2 E_1^*(R) \exp(-ikz)$ , и их считывание первой опорной волной  $E_1 \exp(ikz)$ .

О. в. ф. при ВРМБ даёт пример самообращения и волнового фронта: ни в среде, ни к падающему пучку не предъявляются требования на идеальное оптич. качество, т. е. и среда может быть не идеально однородной, и пучок может иметь расхождение больше дифракционной, — образуется любой волновой фронт. К тому же процесс ВРМБ практически не селективен к частоте возбуждающего излучения. К недостаткам этого метода О. в. ф. следует отнести пороговый характер самого процесса ВРМБ по мощности или энергии падающего пучка.

Достоинствами метода О. в. ф. при ЧВС являются отсутствие порога по амплитуде обрабатываемого сигнала и возможность получить коэф. отражения в обращённую волну больше 1, т. е.  $|E_1|^2 > |E_2|^2$ . Недостаток метода ЧВС — необходимость идеально однородной нелинейной среды, а опорные волны  $E_1$  и  $E_2$  также должны быть идеально обращены друг к другу и обладать высокой мощностью. Последнее требование во многих величинах ведёт к заметным искажениям из-за самофокусировки и нарушению взаимобращённости опорных волн. В ряде случаев мощность опорных волн можно ослабить переходом к резонансным средам, а также к средам с медленно накапливающимся откликом (жидкие кристаллы, фоторефрактивные кристаллы и т. п.).

Разработано ещё ряд методов О. в. ф.: трёхволновое О. в. ф. (при подаче опорной волны на частоте, удвоенной по отношению к сигналу); О. в. ф. нелинейно отражающей поверхностью (в т. ч. О. в. ф. акука); О. в. ф. акука при однородной в пространстве модуляции свойств среды на удвоенной частоте; О. в. ф. с помощью фотонного эха. Существует также гибридная схема О. в. ф., где в методе ЧВС используется ВРМБ-нелинейность, а получение второй опорной волны из первой основано на методе О. в. ф. при ВРМБ [3]. Таким способом можно получить очень большой коэф. отражения обращённой волны,  $|E_1|^2 \gg |E_2|^2$ , с хорошим качеством отражения.

Большой интерес представляют ЧВС-схемы самообращения типа представленной на рис. 5. Здесь падающий пучок 1, к-рый требуется обработать, пропускается

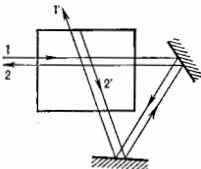


Рис. 5. Схема самообращения волнового фронта с использованием обратной связи.

через нелинейную среду и с помощью оптич. устройств — зеркал (как на рис. 5), световодов и т. п. — вводится в виде пучка 1' в ту же среду под др. углом. Возникающая из флуктуаций волна 2' проходит по тем же устройствам в обратном направлении и снова проходит через среду в виде волны 2. Если волны 1' и 2' взаимно обращены, то автоматически взаимобращёнными будут и волны 1 и 2; именно в этом случае их взаимодействие в нелинейной среде будет наиб. эффективным. Большинство экспериментов с такими схемами проведено с использованием непрерывных лазеров умеренной мощности и фоторефрактивных кристаллов в качестве нелинейной среды [4].

Свойство обращённой волны детально воспроизводит ход падающей волны при своём распространении лежит в основе большинства возможных приложений О. в. ф. [5, 6]. К ним относится прежде всего схема компенсации фазовых искажений при двукратном про-

хождении пучка через усилитель (рис. 6). Идеально направленное излучение малоомощного задающего лазера с помощью полупрозрачного зеркала вводится в усилитель. Оптич. неоднородности последнего сущест-

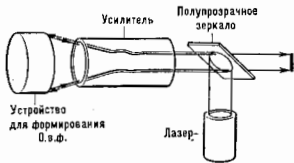


Рис. 6. Схема компенсации фазовых искажений усилителя с использованием обратившего волнового фронта.

венно ухудшают направленность усиленного излучения. Пропецидй пучок обращают тем или иным методом и вновь пропускают через усилитель. В результате обратного прохода обращённая волна восстанавливает идеальную направленность и к тому же дополнительно усиливается. Предполагается также использование О. в. ф. в задачах: самовведения излучения для доставки энергии на мишень малых размеров (в исследованиях по лазерному УТС) и для оптич. связи; оптич. обработки информации; компенсации временного распыления импульсов при передаче информации по волоконным световодам; нелинейно-спектроскопич. исследовании твёрдых тел, жидкостей и газов и др.

Лит.: 1) Зельдович В. Н. и др., О связи между волновыми фронтами отраженного и возбуждающего света при вынужденном рассеянии Мандельштам—Бриллюэн, «Известия АН УССР», 1972, т. 15, № 6; 2) Зельдович В. Н., Пятицкий И. Н. Ф., Шкунов В. В., Обращение волнового фронта, М., 1985; 3) Паскалов В. И., Пасмавик Г. А., Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы, М., 1985; 4) Солнц - Головин М. и др., Theory and application of four-wave mixing in photorefractive media, «IEEE J. Quant. Electronics», 1984, v. QE-20, № 1, p. 12; 5) Shkunov V. V., Zel'dovich V. V., Optical phase conjugation, «Scientific American», 1985, v. 253, № 6, p. 54; в рус. пер. — «Визир науки», 1986, № 2, с. 16; 6) Perreg D. M., Applications of optical phase conjugation, «Scientific American», 1986, v. 254, № 1, p. 74; в рус. пер. — «Визир науки», 1986, № 3, с. 34; 7) Носач О. Ю. и др., Компенсация фазовых искажений в усилительной среде с помощью «бриллюэновского зеркала», «Известия АН УССР», 1972, т. 16, с. 617. Б. Я. Зельдович.

**ОБРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ** ( $T$ -отражение) — операция замены времени  $t \rightarrow -t$ , сопоставляющая к-л. движение (или эволюцию) системы др. движение, в к-ром система последовательно в обратном порядке проходит те же состояния, что и в исходном движении (но с изменёнными на противоположные значениями векторов скорости частицы, моментов, напряжённости магн. поля и др. величин, меняющих знак при такой операции). Если взаимодействия, определяющие эволюцию системы, таковы, что обращённое по времени движение является одним из допустимых движений системы, то говорят о  $T$ - и в а р и а н т н о с т и движения при наличии данных взаимодействий. В классич. механике (или классич. теории поля) условием  $T$ -инвариантности является инвариантность *Лагранжа функции* относительно О. в. Так, ур-ния классич. механики (в отсутствие трения или к-л. др. сил, пропорциональных нечётким производным по времени), как и *Максвелла уравнения*, обладают свойством  $T$ -инвариантности.

В квантовой механике инвариантность ур-ний движения — *Шредингера уравнения* — требует вместе с заменой  $t \rightarrow -t$  комплексного сопряжения волновой ф-ции, что является не унитарной операцией (см. *Унитарные преобразования*). Поэтому не существует понятия временной чётности (см. *Чётность*).  $T$ -отражение переставляет начальные и конечные состояния частиц в матричных элементах амплитуды рассеяния. В силу *теоремы СРТ* нарушение  $CP$ -инвариантности автоматически означает нарушение  $T$ -инвариантности. Поэтому обнаруженное нарушение  $CP$ -чётности в распадах нейтральных  $K$ -мезонов, а также экспери-

менты по посылке дипольного момента нейтрона дадут информацию о нарушении *T-инвариантности* в физике элементарных частиц. (Дипольный момент нейтрона направлен вдоль его спина  $\sigma$ , а гамма-кванты взаимодействуют с внеш. элетрич. полем  $E$ ,  $H \sim \sigma E$ , явно нарушает *T-инвариантность*.)

Известно, что в макроскопич. процессах имеется выделенное направление времени. При этом возникает кажущийся парадокс: хотя ур-ние Ньютона, описывающее движение, напр., молекул в газе, *T-инвариантно*, система стремится к состоянию равновесия, а движение вспять по времени от равновесного состояния к неравновесному не реализуется на практике. В действительности нарушения *T-инвариантности* здесь нет: предпочтительность равновесного состояния обусловлена его макс. вероятностью — равновесных конфигураций гораздо больше, чем неравновесных. Этот факт находит отражение во втором начале термодинамики.

М. И. Високийб.

**ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ОТО)** — современная физ. теория пространства, времени и тяготения; окончательно сформулирована А. Эйнштейном в 1916. В основе ОТО лежит аксеприм. факт равенства инертной массы (входящей в 2-й закон Ньютона) и гравитат. массы (входящей в закон тяготения) для любого тела, приводящий к эквивалентности принципу. Равенство инертной и гравитат. масс проявляется в том, что движение тела в поле тяготения не зависит от его массы. Это позволяет ОТО трактовать тяготение как искривление пространственно-временного континуума. Это искривление пространственно-времени описывается метрикой, определенной из ур-ний теории тяготения (см. *Тяготение*). Пространство Минковского, рассматриваемое в частной (специальной) теории относительности (т.е. в отсутствие тяготеющих тел), обладает высокой степенью симметрии, описываемой группой Пуанкаре. Эта группа в соответствии с принципом относительности порождает изоморфные последовательности событий. В пространстве, где есть поле тяготения, симметрия полностью исчезает, поэтому в нём не выполняется принципа относительности (т.е. нет сохранения относительной или внутренней структуры цепочек событий при действии группы симметрии). Назв. «О. т. о.», принадлежащее Эйнштейну, является поэтому неадекватным и постепенно исчезает из литературы, заменяясь на «теорию тяготения».

И. Ю. Кобзарев.

**ОБЪЕКТИВ** (от лат. *objectus* — предмет) — оптич. система (или её часть), обращённая к объекту наблюдения или съёмки и создающая реальное, перевёрнутое на 180° относительно объекта изображение. В зависимости от типа используемых оптич. деталей О. разделяют на линзовые, зеркальные, зеркально-линзовые и криволинейные. Наиб. распространение получили линзовые О., обладающие широкими возможностями для получения разнообразных характеристик, что достигается увеличением кол-ва линз. Преимуществом зеркальных О. является принципиальное отсутствие хроматических aberrаций и, как следствие, возможность использования для работы в области спектра, ограниченной лишь отражающей способностью зеркальных покрытий. Принципиальный недостаток зеркальных и зеркально-линзовых О. — зкранирование (затенение) центр. части входного зрачка, за счёт чего ухудшается качество изображения и возникает дополнительный потери света. В криволинейных О. наряду с линзами и зеркалами, фазовые голограммы, аналогичные по своим aberr. свойствам в монохроматич. свете линзам с асферич. поверхностями. Хроматич. aberrации киноформов не зависят от свойств материала, из к-рого они выполнены, а определяются (аналогично дифракционным решеткам) пространственной частотой структуры и спектральным диапазоном. Необычные дисперсионные свойства киноформов позволяют в сочетании с линзами, выполненными из обычных марок оптич. стекла,

получать О. *апохроматы*, обладающие лучшим качеством изображения и более простой конструкцией, чем аналогичные О., содержащие кристаллич. среды и особые марки оптич. стекла. Применение киноформных О., не содержащих обычных линз и зеркал, возможно лишь в сочетании с лазерами, обладающими высокой монохроматичностью.

Фотографический О. или аналогичные О. киносъёмочных и телевизионных камер, приборов ночного видения, тепловизоров создают преим. уменьшенные изображения удалённых объектов на слое светочувствит. материала или на фотозащитки. Приёмнике — телевизионной трубке, матрице или линейке фотоприёмников, фотокатоде электронно-оптич. прибора. Масштаб изображения пропорционален  $f'$  — фокусному расстоянию О., а освещённость обратно пропорц. квадрату диафрагменного числа  $K$  ( $K = f'/D$ , где  $D$  — диам. входного зрачка). Величину  $1/K$  наз. *относительным отверстием*, а её квадрат — *светосилой*. Предельное значение диафрагменного числа, при к-ром возможно исправление aberrаций, составляет  $K = 0,5$ , реально достигнутые значения  $K \geq 0,6$ , подавляющее большинство фотогр. О. имеют  $3 > K \geq 1,2$ . Фотогр. разрешающая способность  $N_0$  фото- и кинообъективов зависит от коррекции aberrаций, а также от разрежающей способности  $N_0$  светочувствит. слоя и может быть вычислена по приближённ. ф-ле  $1/N_0 \approx 1/N_{0\sigma} + 1/N_{0\lambda}$ , где  $N_{0\sigma}$  — визуальная разрежающая способность О. Для совр. фотообъективов  $N_0$  достигает  $50 \text{ мм}^{-1}$  в центре поля и  $30 \text{ мм}^{-1}$  для края при съёмке на фокусном расстоянии  $1/4$  (кинонегатив). Часть пространства или плоскости, точки к-рой изображаются О. с требуемым качеством, характеризуются углами в поле м — плоским углом  $2\omega$ , соответствующим телесному углу, соосному с оптич. осью и вершиной в центре входного зрачка. Угли. поле О. совр. фотоаппаратов составляет от  $40^\circ$  до  $70^\circ$ , аэрофотосъёмочных О. достигает  $140^\circ$ . На рис. 4 представлена оптич. схема совр. О. «Милитар» ( $f' = 32 \text{ мм}$ ,  $K = 2,8$ ;  $2\omega = 68^\circ$ ) малогабаритного фотоаппарата с форматом кадра  $24 \text{ мм} \times 36 \text{ мм}$ . О. телевизионных камер и приборов ночного видения не отличаются принципиально от фотообъективов. В О. тепловизоров, работающих в дальней (8–14 мкм) ИК-области спектра, используются оптич. материалы, обладающие показателями преломления  $n > 2$  (германий, селенид цинка, халькогенидные стёкла), что позволяет уменьшить кол-во линз по сравнению с аналогичными по характеристикам О. для видимой или ближней ИК-области спектра. Малая дисперсия Ge позволяет создавать О. все линзы к-рых выполнены из этого материала, не принимая спец. мер для устранения хроматич. aberrаций. Использование асферич. поверхностей германиевых линз позволяет сократить кол-во линз в О., имеющих  $K \geq 1,5$ , до двух.

О. микроскопа — важнейшая часть его оптич. системы, создающая увелич. изображение объекта наблюдения в передней фокальной плоскости окуляра. Масштаб изображения обратно пропорционален фокусному расстоянию О. и составляет примерно от 1,5 до 100 крат. Предел разрешения микроскопа  $e$  — мин. расстояние между центрами светящихся точек объекта, видимых различно, определяется дифракц. явлениями в О. и вычисляется по ф-ле  $e = 0,6 \lambda/A$ , где  $A$  — числовая апертура О., равная произведению показателя преломления среды, находящейся между объектом и О., на синус апертурного угла. Для О. микроскопов  $0,03 \leq A \leq 1,4$ ; диаметр поля изображения — от 18 мм до 32 мм. Простейшие О. микроскопов создают изображение, обладающее значит. кривизной, в результате чего при переходе от наблюдения центр. части поля к его краям необходима перефокусировка.

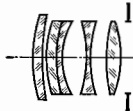


Рис. 1.

При фотографировании диаметр реального изображения сокращается до 6–10 мм. Кривизну изображения в т. п. лав-объективах устраняют сущест. усложнение конструкции: на рис. 2 представлена схема высокоапертурного ( $A = 1,25$ ) планахроматич. О. для металлографич. микроскопа.



Рис. 2.

Особую группу образуют и а к р а т и ч е с к и е О. (иногда иточно наз. *трансформаторами*), фокусное расстояние к-рых может плавно изменяться в широких пределах путём перемещения отдельных линз или групп их вдоль оптической оси. Такие О. применяются в цветных передающих камерах телевидения, в кино- и видеокамерах, а также и в фотоаппаратах. Соотношение между макс. и мин. значениями фокусного расстояния достигает 40 у О. телескопа, 6 — у О. кино- и видеокамер, 3 — у фотот. О. Кол-во линз в нанкратич. О. доходит до 30. Для уменьшения потерь света О. просветляют (см. *Просветление оптики*).

О. з р и т е л ь н ы х т р у б, биноклей и телескопов создают промежуточное изображение удалённых объектов в передней фокальной плоскости окуляра. При диаметрах О., не превышающих 100 мм, наиб. распространённым является О., состоящий из двух склеенных лав. При больших диаметрах линзы не склеиваются. Начиная с diam. 500–800 мм используют зеркальные О., что обусловлено трудностями в получении однородных по показателю преломления крупных заготовок оптич. стекла. Макс. диаметр (6 м) имеет О. телескопа Специальной астр. обсерватории АН СССР на Северном Кавказе. Диафрагменные числа О. телескопов, как правило,  $K \geq 3$ ; угл. поля  $2\omega \leq 10^\circ$ ; предел разрешения — мин. угол  $\theta$  (в секундах) между светящимися равновыярными точками (напр., звёздами), к-рые видны раздельно, определяется по Ф-ле:  $\theta = 140/D$ , где  $D$  измеряется в мм.

Проекционные О. создают увелич. изображения плоских объектов (кинокадров, слайдов, микрофильмов, кинескопов телевизоров) на отражающих и просветных экранах. Оптич. системы этих О. аналогичны фотот. О., но обычно обладают меньшими угл. полями и меньшими диафрагменными числами ( $K \leq 1,8$ ).

Репродукционные О., используемые в репродукции и для фотолитографии при произв. микроэлектронных схем, создают уменьш. изображения плоских оригиналов чертежей, текстов, рисунков, шаблонов; обладают повышенной разрешающей способностью, определяемой дифракцией и достигающей  $1500 \text{ мкм}^{-2}$  для фотолитографич. О. и  $150 \text{ мкм}^{-2}$  для репродуктив. О.

Столь высокие значения достигаются у первых за счёт сущест. усложнения оптич. системы, у вторых за счёт сравнительно малых угл. полей и числовой апертуры. Оптичная схема О. для фотолитографии с разрешением  $\sim 1000 \text{ мкм}^{-2}$  на поле diam. 14 мм представлена на рис. 3.



Рис. 3.

Лит.: Т у д о р о в с к и й А. И., Теория оптических приборов, 2 изд., ч. 1—2, М.—Л., 1948—52; О л о с а р е в Г. Г., Методы расчёта оптических систем, 2 изд., Л., 1969.

А. П. Гримальский.

**ОБЪЕКТЫ С АКТИВНЫМИ ЯДРАМИ** — внегалактич. объекты, характеризующиеся, по крайней мере, одним из следующих признаков активности ядер: высокой мощностью излучения ( $10^{42}$ – $10^{48}$  эрг/с), наличием эмиссионных линий, значительным рентг., ИК- или радиоизлучением, поляризацией излучения, переменностью и выбросами вещества из ядра. Все эти признаки отлича-

ют нестационарные О. с а. я. от стационарных нормальных галактик. К классу О. с а. я. относятся *кварзары*, *сейфертовские галактики*, *лазертиды* и *радиогалактики* с узкими спектральными линиями.

Кварзары и ядра сейфертовских галактик типа 1 ( $Sy1$ ) характеризуются наличием в спектрах широких (соответствующих скоростям до  $15000 \text{ км/с}$ ) разреженных эмиссионных линий (водород, гелий и др.) и узких запрещённых, прежде всего линий кислорода  $[OIII]$  ( $4959 \text{ \AA}$ ,  $5007 \text{ \AA}$ ), а также линий др. элементов, большой амплитудой переменности и сильным рентг. излучением, иногда и  $\gamma$ -излучением. Мл. кварзары являются сильными радиодисточниками, но прямой корреляции между радио- и оптич. активностью нет. Ядра сейфертовских галактик типа 2 ( $Sy2$ ) имеют малую амплитуду переменности, в ср. на порядок меньшую мощность рентг. излучения, но характеризуются значительными ИК-избытками излучения (см. *Астрофотометрия*). Разреженные и запрещённые линии одинаково узкие (от сотен до  $1000 \text{ км/с}$ ). ИК-избытки обусловлены переизлучением пыли с темп-рой неск. сотен кельвинов. Лазертиды, названные так по прототипу BL Lacertae (BL Иерриш), отличаются прежде всего почти полным отсутствием в спектрах сильных эмиссионных линий, что затрудняет определение расстояний до них (невозможно измерить *красное смещение*). Тем не менее установлено, что лазертиды — внегалактич. источники: для одних объектов измерено красное смещение по очень слабым линиям в спектре, для других — красное смещение определено косвенным образом — по характеристикам окружающей туманности. Лазертиды, как и кварзары, имеют на снимках звездобразный вид, однако у нек-рых объектов (так же, как и у нек-рых кварзаров) обнаружены окружающие («родительские») галактики, что, собственно, и даёт основание считать кварзары и лазертиды активными *ядрами галактик*. Амплитуда переменности лазертид составляет  $3^m$ – $4^m$  оптич. поток сильно (у нек-рых объектов до 30–40%) поляризован. Все лазертиды довольно мощные и переменные радиодисточники. Активность радиогалактик, относящихся к О. с а. я., проявляется в оси, в радиодиапазоне. В оптич. диапазоне они характеризуются узкими ( $100$ – $300 \text{ км/с}$ ) эмиссионными линиями.

Предполагается, что перечисленные объекты представляют собой один тип объектов. Различия обусловлены наличием или отсутствием пыли, разными углами зрения (наклонами плоскости галактики к лучу зрения), циклами активности и полными светимостями.

Активность О. с а. я. зависит от природы их центр. источников. Оптич. эмиссионные спектры, к-рые ещё в нач. 1970-х гг. доминировали в построении моделей, есть явление вторичное. Эмиссионные линии возникают довольно далеко от центра ( $10^{17}$ – $10^{18} \text{ см}$ ), поэтому осн. информацию о центр. источниках О. с а. я. даёт исследование переменности их излучения в широком диапазоне эл.-магн. спектра. Естественно, что для большинства О. с а. я. исследована оптич. переменность. Наб. подробные наблюдения переменности проведены для ядра сейфертовской галактики NGC 4151. Это объект считается классич. прототипом О. с а. я.

Многочетные наблюдения переменности ядра NGC 4151 дают след. картину. Макс. амплитуда переменности непрерывного спектра (континуума) — в рентг. диапазоне ( $\sim 2^m$  в диапазоне 2–10 кэВ), минимальная — в ИК-диапазоне (меньше  $0,5^m$  в диапазоне 1,6–2,2 мкм). Характерное время переменности минимально ( $12 \text{ ч}$ ) в рентг. диапазоне (2–10 кэВ), 15 сут в оптич. диапазоне и не менее 2 мес в ИК-диапазоне. Это естественно связать с эфф. размерами соответствующей области излучения — минимальными ( $12$  световых ч) в рентг. диапазоне. Спектр NGC 4151 (рис. 1) имеет плоскую часть в интервале 4 порядков по частоте, что соответствует светимости  $7 \cdot 10^{44}$  эрг/с в диапазоне 10 кэВ — 3 МаВ. Оптич. светимость  $4 \cdot 10^{42}$  эрг/с. Полная светимость ядра NGC 4151 превышает  $10^{46}$  эрг/с,

прцим макс. энергия выделяется в коротковолновом диапазоне. Такая светимость соответствует  $10^{11} - 10^{12} L_{\odot}$  ( $L_{\odot} = 3.8 \cdot 10^{33}$  эрг/с — светимость Солнца), выделяется она в объеме с размерами Солнечной системы (~ 10 световых часов).

Исследования спектральной переменности О. с а. я. привели к обнаружению быстрой (характерное время 2—3 нед) переменности водородных линий  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ , линии углерода CIV (1550 Å) и некоторых других. При этом переменность потока в эмиссионных линиях коррелирует с переменностью УФ-континуума с запаздыванием на 2—4 нед. Время запаздывания больше для линий низкой ионизации ( $H_{\alpha}$ ); напр., для NGC 4151 время запаздывания переменности CIV составляет  $\approx 13$  сут, а  $H_{\alpha}$  — 20—25 сут. Быстрая переменность интенсивности линий свидетельствует прежде всего о высокой концентрации газа в области (оболочке), излучающей разрешенные линии (скорость рекомбинации  $\sim 1/n$ ),  $n \sim 10^{10} - 10^{11}$  см $^{-3}$ . Поскольку при такой плотности оболочки наблюдается мягкое рентг. излучение (0,05—0,5 кэВ), к-рое в этих условиях должно сильно поглощаться, она не может быть сплошной, а состоит, по-видимому, из отд. плотных облаков с большой сваякности (~  $10^{-3}$ ). Облака ионизуются коротковолновым излучением центр. источника, а затем высвечиваются в разрешенных линиях. Интенсивность запрещенных линий постоянна в течение не менее 10 лет. Запрещенные линии образуются на очень дальних расстояниях — до неск. парсек. Экстремальным случаем быстрой переменности эмиссионных линий следует считать переход из одного сейфертовского типа в другой, к-рый наблюдался в неск. объектах, напр. в NGC 4151 (переход Sy1 в Sy2), в NGC 1566 (Sy2 в Sy1). Исчезновение или появление широкого компонента разрешенных линий происходит за неск. месяцев, при этом усиливается или ослабляется континуум, т. е. переход из одного сейфертовского типа в другой также есть результат фотоионизации оболочки перем. излучением центр. источника.

В некр-ых О. с а. я. в радиодиапазоне наблюдаются узкие струи выброшенного вещества (джеты). В NGC 4151 обнаружены узкие переменные эмиссионные линии, к-рые хорошо видны в миминуме блеска около резонансной линии CIV. Эти линии не могут возбуждаться фотоионизацией и, по-видимому, возникают в струях, скорость движения вещества в к-рых ок. 0,1 с. На частоте 15 ГГц в NGC 4151 видны структуры на расстояниях в десятки и сотни парсек, к-рые интерпретируются как джеты S-образной формы. Аналогичные джеты, часто односторонние, наблюдаются и в др. О. с а. я. Возможный период прецессии джетов  $10^4 - 10^6$  лет.

К перечисленным данным наблюдений следует добавить отсутствие строгих периодичностей переменности блеска О. с а. я., значит. долю тепловой составляющей в перем. оптич. излучении (в радиодиапазоне — синхротронное излучение релятивистских электронов в магн. поле), зависимость амплитуды медленной составляющей переменности от наклона галактики и некр-ые др. В целом совокупность данных наблюдений, в т. ч. по переменности континуума в разных диапазонах, позволяет сделать вывод, что наиб. приемлемой моделью О. с а. я. является модель дисковой аккреции на сверхмассивную черную дыру. Известно, что наиб. эфф. механизм выделения энергии (кроме аннигиляции) — аккреция вещества в гравитат. поле черной дыры. При этом может выделяться до 43% полной ( $mc^2$ ) энергии вещества. Следующий по эффективности меха-

низм — термодерные реакции — даёт энергетовыделение на порядок меньше. Модель дисковой аккреции и качественно и количественно объясняет большинство наблюдаемых феноменов О. с а. я., хотя и нуждается в дальнейшей разработке и детализации (напр., тот факт, что осн. доля энергии О. с а. я. выделяется в жестком диапазоне 1 КэВ — 100 МэВ, трудно объяснить в рамках стандартной модели дисковой аккреции, как, впрочем, и в рамках др. моделей). Предлагавшиеся ранее модели компактного звездного скопления или амагнитного наклонного ротора (магнитоида) оказались несостоятельными, в частности как по распределению энергии, так и по характеру переменности в разных диапазонах. Модель дисковой аккреции требует наличия вещества, к-рое образует аккреционный диск и даёт наблюдаемое энергетовыделение. Одним из эфф. механизмов поставки вещества в диск является приливное разрушение звезд в гравитат. поле сверхмассивной черной дыры (достаточно  $\sim 1 M_{\odot}$  в год;  $M_{\odot}$  — масса Солнца). Такой механизм возможен при повнщ. плотности звезд в О. с а. я. Это условие не противоречит наблюдениям: для О. с а. я. характерна повышенная по сравнению с нормальными галактиками концентрация поверхностной яркости (а следовательно, и массы, т. к. поверхностная яркость галактик определяется в основном звездами). С повнщ. концентрацией яркости связан и вопрос эволюции О. с а. я. Существуют две гипотезы: явление О. с а. я. есть фаза в эволюции любой спиральной или эллиптической галактики; активные ядра образуются только в галактиках, имеюших повнщ. концентрацию массы. Второй случай соответствует длинной (~  $10^{10}$  лет) шкале жизни О. с а. я. По-видимому, наблюдения больше поддерживают вторую гипотезу.

Наиб. вероятной представляется след. упрощенная схема О. с а. я. (рис. 2): сверхмассивная (~  $10^6 M_{\odot}$ ) черная дыра с гравитат. радиусом  $\sim 3 \cdot 10^{13}$  см, на к-рую аккрецирует вещество приливно разрушаемых звезд, образующее дискообразную структуру; область рентг. излучения имеет размеры  $10^{14} - 10^{16}$  см (световые часы), затем следует область оптич. континуума (световые дни) и разрешенных эмиссионных линий (до  $10^{17}$  см), область ИК-континуума (световые месяцы), на расстоянии  $\sim 10^{18}$  см (парсеки) — область излучения запрещенных линий. Перпендикулярно плоскости диска расположены оптич. и радиотрубы протяженностью до неск. парсек (в радиодиапазоне). Здесь же, в полнорных конусах диска, вблизи области жесткого излучения, возникают линии высокой ионизации ([FeX] и др.). Проблема образования релятивистских коллимированных струй ещё не решена окончательно. Возможно, перспективной является модель  $\gamma$ -пушки, в к-рой черная дыра имеет определённые вращат. момент и магн. поле. При дисковой аккреции замагниченной плазмы формируется сильное электрич. поле, к-рое ускоряет заряд. частицы перпендикулярно плоскости диска до релятивистских скоростей, что в конечном итоге приводит к мощному потоку  $\gamma$ -излучения. При этом плазма в ядре внутр. части аккреционного диска прозрачна для квантов с характерной энергией  $\sim 100$  МэВ. Коллимированные (уконаливленные) джеты могут быть связаны с узкой направленной пучкой  $\gamma$ -квантов. При массе  $\sim 10^6 M_{\odot}$  и поле  $\sim 10^4$  Гс полный поток энергии направленного  $\gamma$ -излучения и релятивистских электронов достигает  $10^{48}$  эрг/с.

Лит.: Л ю т я Я. В. М., Фотометрические наблюдения ядер активных галактик, в кн.: Астрофизика и космохимическая физика, М., 1982; Л ю т я Я. В. М., Черера п а т у к А. М., Активность ядер галактик в явлении S8 433, *Астрон. ж.*, 1986, т. 63, с. 897;

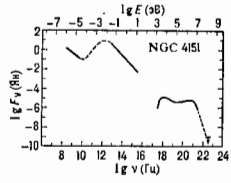


Рис. 1.

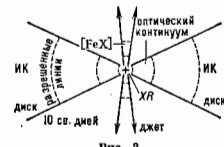


Рис. 2.

Laugel A., Classification of active galaxies and the prospect of a unified phenomenology, «Publics Astron. Soc. Pacific», 1987, т. 90, p. 309.

**ОБЪЕМНАЯ ВЯЗКОСТЬ** — феноменологич. характеристика процесса диссипации энергии при объёмных деформациях среды. Коэф. О. в.  $\zeta$  иногда наз. также вторым коэф. вязкости или в торой вязкостью, для того чтобы подчеркнуть его отличие от коэф. поперечной стоковой вязкости  $\eta$ , к-рую наз. также сдвиговой вязкостью. Коэф. поглощения звука на единицу длины в вязкой среде

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho c^2} \left( \frac{\zeta}{3} + \zeta \right),$$

где  $\rho$  — плотность среды,  $c$  — фазовая скорость звука,  $\omega$  — круговая частота. В отличие от сдвиговой вязкости, характеризующей необратимую передачу энергии поступат. движения среды от одних слоёв к другим, О. в. характеризует квазиравновесный обмен энергией между поступат. движением частиц в звуковой волне и внутр. стенками свободы в веществе. Этот обмен энергией обычно связан с релаксаци. процессами, происходящими в среде при распространении звука (см. *Релаксация акустическая*). В области частот  $\omega$ , отвечающих условию  $\omega t \ll 1$  (где  $t$  — время релаксации), коэф. О. в.  $\zeta = \rho v (\epsilon_\infty^2 - \epsilon_0^2)$ ; здесь  $\epsilon_0$  — скорость распространения звуковой волны в области  $\omega t \ll 1$ , где равновесие успевает полностью установиться за период звуковой волны, а  $\epsilon_\infty$  — скорость звука при больших частотах  $\omega t \gg 1$ , где релаксаци. процесс не успевает пройти за период. При повышении частоты коэф. поглощения, обусловленный релаксаци. процессом, перестаёт зависеть от частоты квадратично — его рост с частотой замедляется и величина  $\alpha$  асимптотически стремится к пост. значению. Поэтому если условие  $\omega t \ll 1$  не выполняется, то говорить об О. в. можно только условно, приписывая коэф. О. в. частотную зависимость:

$$\zeta = \frac{\rho v (\epsilon_\infty^2 - \epsilon_0^2)}{1 + \omega^2 \tau^2}.$$

Значение  $\zeta$  вычисляется по измерениям коэф. поглощения и скорости звука и независимо измеренным значением коэф. сдвиговой вязкости. Величина  $\zeta$  обычно уменьшается при повышении темп-ры и увеличивается с повышением давления. Коэф.  $\eta$  и  $\zeta$  являются величинами одного порядка только в нек-рых одноатомных газах. В большинстве случаев величина  $\zeta$  намного превосходит величину  $\eta$  (табл.).

Значения  $\eta$  и  $\zeta/\eta$  для некоторых жидкостей

Жидкость	T, °C	$\eta$ , 10 <sup>-4</sup> Па·с	$\zeta/\eta$
Вода	15	1,1	2,81
Глицерин	14	61600	1,03
Хлористый натрий	888	115	20,8
Хлористое серебро	571,5	176	27,60
Бензол	20	0,85	130
Сероуглерод	20	0,38	1600

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., *Механика сплошных сред*, 2 изд., М., 1954, § 78; *Физическая акустика*, под ред. У. Маэона, пер. с англ., т. 2, ч. А, М., 1968.

А. Л. Полякова.

**ОБЪЕМНАЯ СИЛА** — то же, что *массовая сила*.

**ОБЪЕМНАЯ СКОРОСТЬ** — поток *колебательной скорости частицы* через данную поверхность. О. с.  $V$  выражается ф-лой  $V = \iint \text{grad} S \cdot d\mathbf{v}$ , где  $\mathbf{v}$  — вектор колебательной скорости частиц в данной точке поверхности,  $\mathbf{n}$  — единичный вектор нормали к поверхности в этой точке,  $dS$  — элемент площади поверхности  $S$ , для к-рой вычисляется О. с. Для излучателя нулевого порядка в виде пульсирующего тела О. с. через поверхность тела равна скорости изменения его объёма. Для излучателя в виде колеблющейся диафрагмы в жё-

стком экране О. с. равна скорости вытеснения среды. При поршневом излучении, т. е. при сифзанном колебании всей излучающей поверхности с одинаковой амплитудой нормальной составляющей колебат. скорости во всех точках, О. с. равна этой составляющей, умноженной на площадь излучающей поверхности.

Для излучателя нулевого порядка к размерам, малыми по сравнению с длиной волны, О. с. через его поверхность практически совпадает с производительностью излучателя, и давление в поле такого излучателя можно выразить через О. с.  $V(t)$  ф-лой

$$p = \frac{\rho}{4\pi r} \frac{\partial V}{\partial t} \left( t - \frac{r}{c} \right),$$

где  $\rho$  и  $c$  — плотность среды и скорость звука в ней, а  $r$  — расстояние от излучателя. Для гармонич. процесса  $V = V_0 \exp(-i\omega t)$  эта ф-ла принимает вид

$$p = -i\rho V_0 \frac{\exp(-i\omega t + ikr)}{4\pi r},$$

где  $V_0$  — амплитуда О. с., равная в этом случае производительности источника звука,  $k$  — *волновое число*.

О. с. сферич. излучателя, совершающего любое нормальное колебание, кроме монополюсного (нульсирингуозного), равна нулю: поток скорости на одной части излучающей поверхности компенсируется потоком противоположного знака на др. части поверхности. О. с. квадруполя и мультиполей высших порядков вообще нулю не равна. При распространении звука по каналам, образованным соединениями труб с разными поперечными размерами, граничным условием на стыках этих труб является равенство О. с. по обе стороны сечения, проведённого через стык. В системе СИ О. с. измеряется в м<sup>3</sup>/с, в системе СГС — в см<sup>3</sup>/с.

Лит.: Ржевский С. Н., *Курс лекций по теории звука*, М., 1960; Исакович М. А., *Общая акустика*, М., 1973.

М. А. Исакович.

**ОБЪЕМНОЙ УПРУГОСТИ МОДУЛЬ** — см. *Модуль упругости*.

**ОБЪЕМНЫЙ ЗАРЯД** — то же, что *пространственный заряд*.

**ОБЪЕМНЫЙ РЕЗОНАТОР** — электромагнитный — замкнутая или почти замкнутая полость с хорошо проводящими стенками, внутри к-рой могут существовать слабоаттенуируемые эл.-магн. колебания. О. р. могут иметь разл. формы экранирующих (проводящих) оболочек: сферические, цилиндрические, прямоугольные и т. п. Существуют О. р. с многосвязными в сечении границами, напр. бифермачные, коаксиальные. Хотя под О. р. всегда подразумевают твёрдые объекты, иногда говорят о двумерных и даже одномерных О. р., имея в виду системы, поля в к-рых слабо зависят от одной из двух декартовых координат.

Простейшей моделью, описывающей спектральные свойства одномерного О. р., является идеальный *интерферометр Фабри — Перо*, состоящий из двух бесконечно проводящих плоскостей, между к-рыми, последовательно отразившись, «метается» плоская эл.-магн. волна. Как и в случае струны с жёстко закрепленными концами, в такой системе возможны собственные (нормальные) *сигусоидальные* [ $-\exp(i\omega_n t)$ ] колебания (моды) с частотами  $\omega_n = \pi n/l$ , где  $l$  — расстояние между отражателями (при заполнении средой с проницаемостями  $\epsilon$  и  $\mu$  надо заменить  $c$  на  $c/\sqrt{\epsilon\mu}$ ),  $n = 1, 2, 3, \dots$  — число полуовнов  $\lambda_n/2 = \pi c/\omega_n = l/n$ , укладывающихся между пластинами.

В двумерных и трёхмерных О. р. общая картина свойств эл.-магн. колебаний существенно богаче по спектру собств. частот, поляризации, характеристикам и по распределению полей в пространстве. Для отыскания собств. колебаний эл.-магн. поля в таких О. р. приходится решать краевую задачу для *Максвелла уравнений* с зависимыми от проводимости стенок граничными условиями. Обычно вначале рассчитывают т. в. идеальный О. р., у к-рого потери в заполняющей среде и на излучение отсутствуют, а



ступки являются бесконечно проводящими (идеально отражающими). При этом задача о собств. колебаниях сводится (в однородной среде) к решению векторного волнового уравнения для поля  $E$  при условии обращения в нуль его тангенциальной составляющей на стенках резонатора  $S$ :

$$\Delta E + \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 E = 0, \operatorname{div} E = 0, E_{\text{танг}}|_S = 0, H = ic\omega^{-1} \operatorname{rot} E. \quad (1)$$

Прямоугольный резонатор. Если полость  $O, p$  представляет собой прямоугол. параллелепипед  $0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, 0 \leq z \leq l$  (рис. 1), то при решении задачи (1) используют декартову систему координат, в к-рой переменные векторного волнового ур-ния допускают разделение. Такой  $O, p$  можно рассматривать как «закороченный» (перерогорченный проводящими стенками) отрезок прямоуг. волновода *металлического, ориентированный*, напр., в  $z$ -направлении и имеющий длину  $l$ ; он напоминает интерферометр Фабри — Перо с той лишь разницей, что между плоскостями  $z = 0$  и  $z = l$

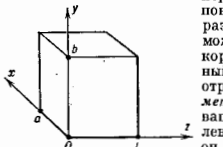


Рис. 1. Прямоугольный объемный резонатор.

теперь «мечутся» волноводные моды, т. е. плоские неоднородные волны. Поэтому классификацию собств. колебаний прямоуг.  $O, p$  обычно производят по типам волноводных мод, как бы «поименных» между плоскостями  $z = 0, z = l$ . Различают колебания  $TE_{nmp}$ - и  $TM_{nmp}$ -типов. В первом случае речь идет о стоячей волноводной  $TE$ -волне, в к-рой вектор  $E$  поляризован в плоскости  $z = \text{const}$ , а проекции полей  $E$  и  $H$  на оси  $(x, y, z)$  имеют вид

$$\begin{aligned} E_x &\sim k_y k_z^{-1} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z), \\ E_y &\sim -k_x k_z^{-1} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z), \\ H_x &\sim ic k_x k_z \omega^{-1} k^{-1} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z), \\ H_y &\sim ic k_y k_z \omega^{-1} k^{-1} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z), \\ H_z &\sim -ic \left( k_x^2 + k_y^2 \right) \omega^{-1} k^{-1} \cos(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $k_x, k_y, k_z$  — компоненты волнового числа  $k$ :  $k^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 / c^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2, \quad (3)$

причем граничное условие  $E_{\text{танг}}|_S = 0$  фиксирует величины этих компонент

$$k_x = k_x^{(n)} = n\pi/a, k_y = k_y^{(m)} = m\pi/b, k_z = k_z^{(p)} = p\pi/l. \quad (4)$$

Следовательно, спектр собств. частот определяется ф-лой

$$\omega_{nmp}^2 = \frac{c^2 n^2}{\epsilon_0 \mu_0} \left( \frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} + \frac{p^2}{l^2} \right). \quad (5)$$

Индексы  $n, m, p$  пробегает значения  $0, 1, 2, \dots$ , во в нуль может обращаться только один из них. Мин. собств. частота свойственна моде, у к-рой равен нулю индекс, относящийся к наим. размеру  $O, p$ , напр. при  $l > b > a$  это  $\omega_{011} = c\pi(b^{-2} + l^{-2})^{1/2} / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ . Структура поля в такой моде, а также структура поля моды  $TE_{111}$  воспроизведены на рис. 2. Поля типа  $TM_{nmp}$  можно получить из (2) заменой  $E \rightarrow H, H \rightarrow E, \epsilon \leftrightarrow \mu$ , однако при этом граничное условие  $E_{\text{танг}}|_S = 0$  преобразуется в  $H_{\text{танг}}|_S = 0$ , т. е. изменятся эл.-динамич. свойства стенок резонатора: они вместо «электрических» становятся «магнитными».

Для задания  $TM$ -полей в идеальном  $O, p$  с «электрическими» стенками соответствующее «магнитным» стенкам решение необходимо сдвинуть на четверть периода,

т. е. заменить  $z \rightarrow z + \pi/2k_z^{(p)}, y \rightarrow y + \pi/2k_y^{(m)}, x \rightarrow x + \pi/2k_x^{(n)}$  ( $k_x^{(p)} \neq 0, k_y^{(m)} \neq 0, k_z^{(n)} \neq 0$ ). В результате такого сдвига спектр собств. колебаний (4), (5) останется без изменений, но ни один из индексов  $n, m, p$  не сможет уже принимать нулевое значение, все они будут начинаться с 1:  $n = 1, 2, 3, \dots; m = 1, 2, 3, \dots; p = 1, 2, 3, \dots$  Распределение поля в моде типа

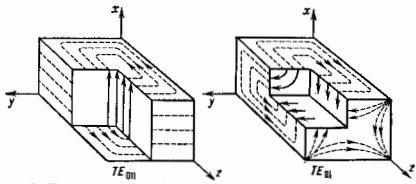


Рис. 2. Проекции колебания (моды)  $TE_{011}$ -типа в прямоугольном объемном резонаторе. Распределение электрических (сплошные линии) и магнитных (пунктир) полей.

$TM_{111}$  показано на рис. 3.

Т. о., все собств. колебания идеального  $O, p$  с ненулевыми индексами,  $n \neq 0, m \neq 0, p \neq 0$ , оказываются, по крайней мере, дву-

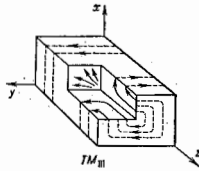


Рис. 3. Распределение электрического (сплошные линии) и магнитного (пунктир) полей в моде типа  $TM_{111}$  прямоугольного объемного резонатора.

кратно вырожденными по  $TE$ - и  $TM$ -поляризациям. Степень вырождения может быть и более высокой, если к.-л. из размеров  $a, b, l$  совпадают между собой. Макс. кратность вырождения (12) достигается для частот  $\omega_{nnp}$  кубического  $O, p$ . ( $a = b = l$ ).

Резонаторы, в к-рых возбуждены вырожденные моды, эквивалентны  $LC$ -контурам, имеющим одну и ту же собств. частоту  $\omega = (LC)^{-1/2}$ , но никак не связанным друг с другом. При наличии индуктивной или емкостной связи вырождение снимается, такая система контуров будет колебаться на новых нормальных частотах, различающихся между собой. В случае двух контуров (двух мод) зависимость новых частот от старых определяется известным графиком Вина (см. также *Связанные системы*). В  $O, p$  связь между вырожденными модами может осуществляться безынерционной деформацией

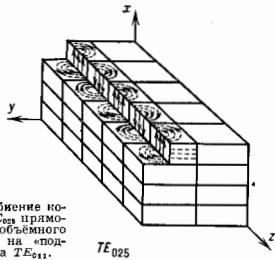


Рис. 4. Разбиение колебания  $TE_{022}$  прямоуг. объемного резонатора на «подмоды» типа  $TE_{021}$ .

цей стенок или внесением внутрь небольших возмущающих тел, напр. проводящих шариков радиусом  $r \ll \lambda$ ; при помещении последних в пучности поля  $E(H)$  связь получается емкостной (индуктивной). На

такой перестройке О. р. при внесении внутрь малых локализ. вкраплений осевым один из методов измерений распределения полей в О. р.

В прямоуг. О. р. поля имеют чистую структуру: любая высокая мода в них разбивается на «подмоды» типа  $TM_{111}$ ,  $TE_{111}$ , или  $TE_{011}$ , как это показано на рис. 4. Низкие моды прямоуг. О. р. следует рассматривать в качестве элементарных. В технике довольно часто (но не всегда) О. р. используют в режиме одного колебания, обычно обладающего наимизшей собств. частотой.

Цилиндрический резонатор. С помощью плавных деформаций сеченк О. р. можно проследить за топологическими подобными изменениями структуры собств. мод.

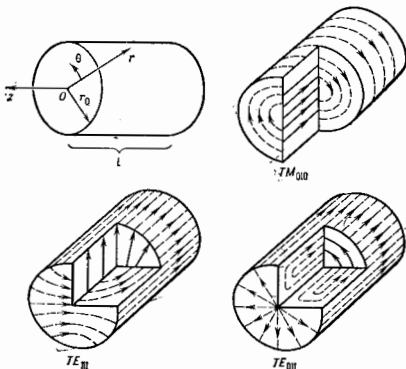


Рис. 5. Простейшие колебания (моды) в цилиндрическом объемном резонаторе. Распределение электрического (сплошные линии) и магнитного (пунктир) полей.

Так, осн. мода  $TE_{110}$  прямоуг. резонатора преобразуется в моду типа  $TM_{010}$  цилиндрич. резонатора. Смена обозначений связана с тем, что в координатах  $\theta, r, z$  (рис. 5) поле не зависит от координат  $\theta$  и  $z$ . Строгие количеств. данные о частотном спектре и структуре собств. колебаний цилиндрич. (и любого другого) резонатора удаётся получить только из несредств. решения краевой задачи (1): в цилиндре радиусом  $r_0$  и высотой  $l$  при  $l < 2,04r_0$  мин. частоту имеет мода  $TM_{010}$ ,  $\omega_{010} = 2,4 c/r_0 \sqrt{\epsilon\mu}$ ; с ростом  $l$  происходит смена осн. колебаний, им становится мода  $TE_{111}$  ( $H_z \neq 0, H_r \neq 0, E_\theta \neq 0, E_z \neq 0$ ),  $\omega_{111}^2 = c^2 \epsilon^{-1} \mu^{-1} \{ (1,84/r_0)^2 + (\pi/l)^2 \}$ . Среди собств. колебаний цилиндрич. резонатора типа  $TE$  наиб. простой структурой обладает симметричная относительно осей  $z$  мода  $TE_{011}$  ( $H_z \neq 0, H_r \neq 0, E_\theta \neq 0$ ),  $\omega_{011}^2 = c^2 \epsilon^{-1} \mu^{-1} \{ (3,83/r_0)^2 + (\pi/l)^2 \}$ . Хотя эта мода не является основной ( $\omega_{111} < \omega_{011}$ ), её часто используют на практике благодаря более низким, чем у моды  $TE_{111}$ , потерям, связанным с неидеальностью стенок резонатора. Фигурирующие в ф-лах для собств. частот числа 1,84; 2,40; 3,88 являются корнями ф-ции Бесселя и её производных:  $J_0'(1,84) = 0, J_0'(2,40) = 0, J_1'(3,83) = 0$ .

На рис. 6 показана возможность последоват. трансформации цилиндрич. резонатора в резонатор клиндропного типа с гантелеобразным аксиальным сечением, к-рый можно рассматривать как экранированный LC-

контур, где конденсатор  $C$  и индуктивность  $L$  составляют единое целое.

Добротность резонатора. Реальные О. р. отличаются от идеальных О. р. прежде всего наличием потерь (в среде, заполняющей полость, в экранирующих стенках, а также в местах ввода и вывода энергии). Если потери в заполняющей среде распределены однородно, то они не вносят изменений в структуру отд. компонент полей, но превращают чисто действительные собств. частоты в комплексные:  $\omega \rightarrow \omega_d + i\omega_m$ ; соответствующие моды становятся затухающими:  $e^{i\omega t} \rightarrow e^{i\omega_d t - \omega_m t}$ . Декремент затухания  $\omega_m$  определяется путём замены в (3) и (5)  $\epsilon \rightarrow \epsilon_d - i\epsilon_m, \mu \rightarrow \mu_d - i\mu_m$  и в случае малых потерь ( $\epsilon_m \ll \epsilon_d, \mu_m \ll \mu_d$ ) равен  $\omega_m = \omega_d (\epsilon_m/\epsilon_d + \mu_m/\mu_d)/2$ . Поглощение в экранирующей оболочке, как правило, учитывают методом малых возмущений. Удобно использовать *Леонтовича граничное условие* для тангенциальных составляющих полей  $E, H$ , к-рое фактически лишь слегка модифицирует краевую задачу (1). По методу малых возмущений расчёты выполняются обычно в vicinity устройств ввода-вывода эл.-магн. энергии, связываю-

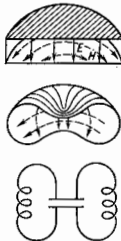


Рис. 6. Переход от цилиндрического резонатора с модой типа  $TM_{010}$  при плавной деформации стенок к резонатору клиндропного типа, в котором электрическое (сплошные линии) и магнитное (пунктир) поля пространственно разделены (как в колебательном контуре).

щих объёмный резонатор с внешними системами.

По аналогии с LC-контуром качество О. р. часто характеризуют его добротностью  $Q$ . Добротность определяют либо по уширению резонансных линий,  $Q = \omega/\Delta\omega = \omega_d/\omega_m$ , либо как отношение запасённой в О. р. энергии  $W$  (средней за период колебаний  $2\pi/\omega_d$ ) к мощности ср. потерь  $P$ :  $Q = \omega_d W/P$ . Последнее определение всегда требует уточнения, т. к. зависит от выбора границ раздела между областью, где энергия запасается, и областью, где она диссипируется.

В случае высокодобротных О. р. потери можно считать аддитивными и каждому их каналу поставить в соответствие свою (парциальную) добротность  $Q_i \gg 1$ . Так, добротность, связанная с поглощением в среде, равна  $Q_1 = 2 (\epsilon_m/\epsilon_d + \mu_m/\mu_d)^{-1}$ , а добротность, связанная с поглощением в стенках,  $Q_2 \sim V/S\delta$  ( $V$  — объём,  $S$  — поверхность полости,  $\delta$  — толщина скин-слоя). Особую роль в теории О. р. играет добротность связи, или нагруженная добротность  $Q_3$ , определяющая потери на излучение вовне. В режиме оптимального резонансного возбуждения величина  $Q_3$  равна половине суммарной добротности:  $Q_3 = Q/2$  ( $Q^{-1} = \sum_i Q_i^{-1}$ ).

Поскольку любой О. р. является многомодовым, то следует иметь в виду, что по мере уменьшения  $Q$  уширение резонансных линий может стать сравнимым с расстоянием между соседними собств. частотами, к-рые по существу уже перестают быть таковыми. При этом О. р. утрачивает свои избирательные (резонансные) свойства. Мин. значения добротностей, при к-рых ещё можно говорить о резонансных эффектах,  $\sim 10$ . Обычно добротности О. р. характеризуются значительно более высокими числами; напр., на осн. колебаниях в СВЧ-диапазоне они достигают  $10^3$ , а при применении сверхпроводящих экранов  $\sim 10^5 - 10^7$ .

Как уже отмечалось, О. р. чаще всего используют на низших собств. частотах. Однако иногда необходимо работать с высокими модами, избегая паразитного возбуждения других, «неробочих» мод. С данной проблемой, к-рую наз. проблемой *селекции мод*, приходится сталкиваться, напр., в электронике СВЧ, где в интересах повышения мощности часто объём резонатора стараются делать большим по сравнению с  $\lambda^2$ .

Возбуждение О. р. осуществляют обычно с помощью штырей, петель, щелей, отверстий, к к-рым подводят пазы эл.-магн. энергию, примерно так же, как в случае волноводов (см. *Антенны*). В теории таких возбуждающих устройства часто можно заменить на эквивалентные им сторонние электрич. и магн. токи с плотностями  $j^{exch}(\omega t)$  и  $j^{mexch}(\omega t)$ . Для зфф. возбуждения О. р. требуется, чтобы ток  $j^{ex}$  был ориентирован вдоль поля  $E$ , а ток  $j^{mex}$  — вдоль поля  $H$  нужной моды, т. к. соответствующие коэф. возбуждения пропорц. интегралам  $\int (j^{ex} E) dV$  и  $\int (j^{mex} H) dV$ . С чисто матем. позиций задача о вынужденных колебаниях О. р. сводится к решению ур-ния (1), в правой части к-рого стоит возбуждающая сила  $4\pi e^{-1}(\text{rot} j^{mex} - i\omega \epsilon^{-1} j^{ex})$ .

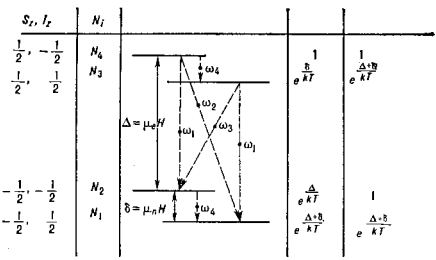
О. р. с металлич. стенками применяют в технике СВЧ ( $10^9 - 10^{11}$  Гц) как частотные фильтры и резонансные колебат. системы усилителей, усилителей, приёмных устройств, анализаторов спектра и др. Начиная с частот  $\sim 10^{11}$  Гц О. р. при работе на первой моде становится внешне миниатюрными ( $l \sim \lambda \sim 1$  мм), к тому же их добротность ухудшается по закону  $Q \sim \lambda^{1/2}$ , поскольку толщина скин-слоя уменьшается пропорц.  $\lambda^{1/2}$ , а размеры О. р. — пропорц.  $\lambda$ . В миллиметровом, субмиллиметровом и оптич. диапазонах О. р. вытеснены большими (в масштабе  $\lambda$ ) открытыми резонаторами квазиоптич. типа, в к-рых осуществляется разрежение спектра стопа, частот за счёт «высвечивания» части мод через открытые участки боковых поверхностей.

О. р. встречаются и в природных условиях, причём экранирующие поверхности у них яе обязательно хорошо проводящие. Напр., существует бисферич. О. р. Земля — ионосфера. Земля является электропроводящим экраном, а ионосфера — рефракционным (взап. полного внутр. отражения волн). Аналогичные О. р., обычно представляющие собой отрезки *волноводов диэлектрич.к* (плоско-параллельных или цилиндрич.к), встречаются и в технике.

Лит.: Вайнштейн Л. А., *Электромагнитные волны*, 2 изд., М., 1988; Лебедев И. В., *Техника и приборы СВЧ*, 2 изд., т. 1, М., 1970; Джексоуи Д. Дж., *Классическая электродинамика*, пер. с англ., М., 1985; Вайнштейн Л. А., В. В., *Высокая частота электродинамика*, М., 1988; Никольский В. В., Никольский Г. И., *Электродинамика и распространение радиоволн*, 3 изд., М., 1989.

**ОБЫКНОВЕННЫЙ ЛУЧ** — см. *Кристаллооптика*.  
**ОБЕРХАУЗЕРА ЭФФЕКТ** — увеличение интенсивности *ядерного магнитного резонанса* и поляризации ядерной магн. системы при насыщении *электронного парамагнитного резонанса*. О. э. наблюдается в условиях релаксац. процесс, содержащий в каждом акте связанное однопнаправленное изменение ядерных спиновых переменных и определяющий стационарное состояние ядерной магн. системы (см. *Ориентированные ядра, Параманетика*). О. э. предсказан А. Оберхаузером (A. W. Overhauser) в 1953 для взаимодействующих спиновых систем электронов проводимости и ядер в металлах. В том же году О. э. был экспериментально подтверждён Т. Карвером (Th. R. Carver) и Ч. Сликтером (Ch. P. Slichter), впоследствии наблюдался в полупроводниках, жидкостях с парамагн. примесями и твёрдых телах с высокой концентрацией свободных радикалов или парамагн. примесей. О. э. является одним из методов динамич. поляризации ядер. Для его объяснения существенны два явления: *земановское расщепление* магн. уровней (см. *Земанова эффект*) и *релаксация* — процесс возвращения возбуждённой системы в состояние термодинамич. равновесия.

Магн. моменты микрочастиц могут иметь только опред. ориентации в магн. поле, к-рым соответствует опред. значения энергии (энергетич. уровни). На рис. изображена структура этих уровней для электроноядерной системы с электронным спином  $S = 1/2$  и ядерным спином  $I = 1/2$ . Земановское расщепление для электронного спина равно  $\Delta = \mu_e H$ , для ядерного



Структура аземановских энергетических уровней электронноядерной системы с  $S = 1/2$  и  $I = 1/2$ . Штриховые линии соответствуют различным видам релаксаций. Сиврава в первом столбце — относительно равновесные населённости уровней,  $N_i/N_4$ , во втором столбце — те же величины в условиях эффекта Оберхаузера при  $\omega_2 = \omega_4 = 0$ .

спина  $\delta = \mu_n H$ , где  $H$  — напряжённость внеш. магн. поля,  $\mu_e$  и  $\mu_n$  — магн. моменты электрона и ядра. Поскольку  $\mu_e \gg \mu_n$ , имеем  $\Delta \gg \delta$ . Термодинамически равновесная поляризация электронной и ядерной магн. систем определяется населённостью электронных уровней  $S_z = \pm 1/2$  и ядерных уровней  $I_z = \pm 1/2$ . Отношение населённости соответствует распределению Больцмана:

$$N_3/N_1 = N_4/N_2 = e^{-\delta/kT}, \quad N_4/N_3 = N_2/N_1 = e^{-\Delta/kT},$$

где  $N_i$  — населённость уровней, соответствующих рис. Возбуждение переходов  $\Delta S_z = 1, \Delta I_z = 0$  отвечает ЭНР, а переходов  $\Delta S_z = 0, \Delta I_z = 1$  — ЯНР. Если приложить к образцу достаточно сильное перем. магн. поле с частотой ЭНР  $\Omega = \Delta/\hbar$ , то электронные переходы можно насытить, т. е. выровнять населённости уровней, между к-рыми происходит соответствующие переходы ( $\Delta S_z = 1, \Delta I_z = 0$ ), при этом  $N_1 \approx N_3$  и  $N_2 \approx N_4$ . Магн. ВЧ-поле переводит электроны в верх. состоянии, а релаксац. процессы стремятся восстановить состояние термодинамич. равновесия. Конкуренция этих процессов определяет амплитуду ВЧ-поля, необходимую для насыщения ЭНР. Ответственный за это релаксац. процесс (со скоростью релаксации  $\omega_1$ ) не приводит к перероентации ядерных спинов.

Существование флукутирующего сверхтонкого взаимодействия, связанного либо с движением носителя электронного спина, либо с быстрой перероентацией этого спина в обменном поле, приведёт к появлению др. релаксац. процессов. Контактное фермиевское взаимодействие приводит к релаксац. процессу типа  $\Delta S_z = -1$  при  $\Delta I_z = 1$ , и наоборот (со скоростью взаимодействия  $\omega_2$ ). Флукутирующее дипольное взаимодействие приведёт к процессу типа  $\Delta S_z = -1, \Delta I_z = -1$  (со скоростью релаксации  $\omega_3$ ). В ядерной магн. системе существуют релаксац. процессы  $\Delta S_z = 0, \Delta I_z = 1$  (со скоростью релаксации  $\omega_4$ ).

Для О. э. характерно соотношение  $\omega_2 \gg \omega_3, \omega_4$ . Если процесс, ведущий к изменению населённости, отвечает переходам между уровнями 4 и 1. При этом происходит однопнаправленные перевороты ядерных спинов, приводящие к след. отношению населённости:  $N_4/N_2 = N_3/N_1 = \exp(\Delta + \delta)/kT$ . Т. о., поляризация ядер в состоянии термодинамич. равновесия определяется величиной земановского расщепления в ядерной магн. системе, а в условиях О. э. — земановским расщеплением в электронноядерной системе. При высоких темп-рах, когда  $\Delta, \delta \ll kT$ , поляризация возрастает в  $\mu_e/\mu_n \sim 10^3$  раз. Неполное насыщение ЭНР и ключевые значения величин  $\omega_2$  и  $\omega_3$  приводят к ослаблению поляризации ядер при О. э. При  $\omega_3 \gg \omega_2, \omega_4$  поляризация ядерной магн. системы будет противоположной.

О. э. наряду с др. эффектами динамич. поляризации ядер используются для изучения ядерной магн. системы и получения системы полярисов. ядер.

Лит.: А в я т ш у л е в С. А., К о з ы р е в В. М., Электронный парамагнитный резонанс: соединения элементов промежуточных групп, 2 изд., М., 1972; А б р а м о в К. А., Динамический магнетизм, пер. с англ., М., 1963; Д ж е ф ф р и с К., Динамическая ориентация ядер, пер. с англ., М., 1965; А н а р к и и В. А., Динамическая поляризация ядер в твердых диэлектриках, М., 1980. В. А. Трунин.

**ОВШИНСКОГО ЭФФЕКТ** — см. в ст. *Переключения эффектов*.

**ОДНОВИБРАТОР** (реде времени, моностабильный триггер, ждущий мультивибратор) — электронная схема, генерирующая под действием входного импульсного сигнала одиночный импульс напряжения заданной длительности (обычно прямоугол. формы). О. представляет собой схему, к-рая может находиться в одном из двух состояний. Одно из состояний является устойчивым, а во второе, метастабильное, состояние схема может перейти только под действием внеш. сигнала. Возврат в устойчивое состояние происходит автоматически. Время пребывания в метастабильном состоянии, определяющее длительность генерируемого импульса, зависит только от параметров схемы О., и изменение характеристик входного импульса в нек-рых пределах на него не влияет. Обычно это время определяется временем зарядки или разрядки конденсатора, входящего в схему О.

Классич. схема О. представляет собой *триггер*, в к-ром одно из сопровращений *положительной обратной связи* заменено конденсатором (рис., а). В исходном состоянии транзистор  $T_1$  закрыт, транзистор  $T_2$  открыт, конденсатор  $C$  заряжен до напряжения питания. Положительный входной импульс открывает транзистор

в О. происходит лавинообразно и выходной импульс имеет крутые фронты.

О. широко применяются для задержки и удлинения импульсов, формирования разл. управляющих сигналов и т. п.

Лит.: Т и т ц е У., Ш е н к Р., Полупроводниковая схемотехника, пер. с нем., М., 1982. А. В. Степанов.

**ОДНОДОМЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ** — ферро-, ферри- и слабоферромагнитные частицы малых размеров (меньше критического  $r_c$ , см. ниже), в к-рых образование *магнитной доменной структуры* невыгодно энергетически.

Однородно намагниченному состоянию массивного образца размером, большим  $r_c$ , соответствует большая *магнитоэстатическая энергия*  $\epsilon_m \sim 2\pi N M_s^2 V$ , где  $M_s$  — намагниченность насыщения,  $V$  — объём образца,  $N$  — численный фактор, зависящий от формы образца. При переходе в многодоменное состояние  $\epsilon_m$  понижается настолько, что полная энергия  $\epsilon$  образца оказывается меньше его энергии  $\epsilon_0$  в однодоменном состоянии. Именно с этим выигрышем в энергии ( $\epsilon_0 - \epsilon$ ) и связано существование многодоменного состояния в массивных образцах. Однако указанный выигрыш в энергии уменьшается с уменьшением линейных размеров образца. Это связано с тем, что при образовании доменов к полной энергии, энергии образца добавляется *энергия доменных стенок*  $\epsilon_d$ , к-рая при уменьшении размеров образца  $r$  уменьшается медленнее, чем  $\epsilon_m$ . Следовательно, начиная с нек-рого размера образца  $r = r_c$  выигрыш в энергии, связанный с уменьшением  $\epsilon_m$ , становится меньше проигрыша в энергии, связанного с образованием доменных стенок. Т. о., в частицах с  $r \leq r_c$  энергетически выгодным оказывается однодоменное состояние. Величину  $r_c$  наз. критическим размером однодоменности.

На возможность существования О. ч. впервые обратил внимание Я. И. Френкель с Я. Г. Дорфман (1930).

Значение  $r_c$  для разных магн. материалов заключено в пределах  $10^{-2} - 10^{-9}$  см.

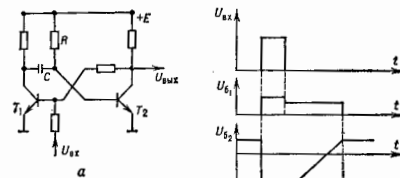
Для образования однодоменного состояния вовсе не обязательно, чтобы малыми были все размеры образца. В однодоменном состоянии может находиться, напр., магнитно-односный образец в виде тонкого и бесконечно длинного цилиндра с осью, параллельной *оси легкого намагничивания*. То же относится и к тонким *магнитным плёнкам* с толщиной меньше нек-рой критической, но с безграничными размерами в плоскости, параллельной поверхности.

Из-за больших энергий, барьеров между разл. магн. состояниями однодоменное состояние частиц, напр. в кубовом внеш. магн. поле  $H$ , может быть метастабильным. В связи с этим, являясь однодоменными при  $H = 0$ , частицы не обязательно остаются таковыми при изменении направления намагниченности под влиянием  $H$ . На это впервые обратил внимание Е. И. Кондорский (1952), к-рый ввёл понятие *абсолютной однодоменности*. Абсолютно однодоменными являются частицы с размерами  $r < r_0$  ( $r_0$  — размер абсолютно однодоменной частицы), в к-рых при любых значениях и направлениях  $H$  намагниченность остаётся однородной по всему объёму образца.

Аналитич. выражение размера  $r_0$  для сферич. ферромагн. частицы

$$r_0 = \frac{\pi_1 (3A)^{1/2}}{M_s (\Delta T)}$$

было найдено У. Брауном (W. F. Brown) в 1957. В этой ф-ле  $A$  — обменный параметр,  $\pi_1 = 2,08$ . Для  $(A = 0,8 \cdot 10^{-8}$  эрг/см,  $M_s = 1700$  Гс)  $r_0 = 53,5$  А. Возможность существования О. ч. имеет важное практ. значение, напр., для изготовления высокоэнергетич. пост. магнитов, получаемых путём прес-



Одновибратор на биполярных транзисторах: а — схема одновибратора; б — временные диаграммы;  $U_{вх}$  — входное напряжение;  $U_{11}$ ,  $U_{21}$  — напряжения на базах транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ ;  $U_{22}$  ( $U_{12}$ ) — напряжение на коллекторе транзистора  $T_2$  (выходное напряжение).

$T_1$ , напряжение на его коллекторе падает, и начинается перезарядка конденсатора через открытый транзистор  $T_1$  и сопротивление  $R$ . Скачок потенциала коллектора транзистора  $T_1$  через *дифференцирующую цепь RC* передаётся на базу транзистора  $T_2$  и закрывает его. О. находится в метастабильном состоянии: высокий потенциал коллектора транзистора  $T_2$  через сопротивление  $R$  передаётся на базу транзистора  $T_1$  и поддерживает его в открытом состоянии, если даже входное напряжение уменьшится до нуля, а ток перезарядки конденсатора, протекающий через сопротивление  $R$ , поддерживает запирающее напряжение на базе транзистора  $T_2$ . Через время  $t \approx RC$  ток перезарядки уменьшается настолько, что потенциал базы транзистора  $T_2$  становится достаточным для его отпирания, напряжение  $U_{вх}$  падает и транзистор  $T_1$  закрывается. О. возвращается в исходное состояние. Благодаря положительной обратной связи переходы из одного состояния в другое

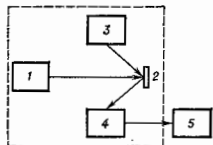
сования конгломератов однодольных частиц, а также для магн. записи информации.  
 Лун. В. И. Соколовский С. В., Магнетизм, М., 1971; Браун У. Ф., Микромагнетизм, пер. с англ., М., 1979.  
 Б. И. Филиппов.

**ОДНООСНЫЕ КРИСТАЛЛЫ** — кристаллы, в к-рых происходит двойное лучепреломление при всех направлениях падающего на них луча света, кроме одного, называемого оптической осью кристалла. См. Кристаллооптика.

**ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИЯ** — область электронной спектроскопии, в основе к-рой лежат измерение энергии и интенсивностей токов оже-электронов, а также анализа формы линий спектров оже-электронов, эмитированных атомами, молекулами и твёрдыми телами в результате оже-эффекта. Энергия оже-электронов определяется природой испускающих их атомов и взаимодействием этих атомов с окружающими, что приводит к небольшим изменениям энергии оже-электронов. Поэтому по оже-спектрам можно определить элементный состав приповерхностных слоёв твёрдых тел, получать информацию о межатомах взаимодействиях, осуществлять хим. анализ газов. О.-с. газов используются также для исследования механизма оже-эффекта, основных и возбуждённых состояний дважды ионизов. атомов, разл. эффектов, связанных с процессом нач. возбуждения атома. Анализ элементного состава производится путём сопоставления оже-спектров с табличными данными. Расположение пика в энергетич. спектре оже-электронов несёт информацию о хим. природе атомов, его амплитуда — об их концентрации. Взаимодействие атома с его окружением проявляются в форме оже-пиков и их энергетич. сдвигов.

В О.-с. атомы возбуждают электронами, фотонами (рентгеновским) и ионным пучками, соответственно релятивистскую электронную (ЗЭС), рентгеновскую (РОС) и ионную (ИОС) О.-с. Регистрацию оже-спектров производится с помощью оже-спектрометров, близких по конструкции в случае ЗЭС, РОС и ИОС (рис. 1). Исследуемый образец помещают в вакуумную (до  $10^{-11}$  мм

рт. ст.) камеру и облучают пучками первичных частиц, источниками к-рых служат электронная пушка, рентр. трубка и ионная пушка; они должны обеспечивать потоки частиц, интенсивность к-рых достаточна для эмиссии оже-электронов в пол-ве, надёжно регистрируемом мерит. аппаратурой. Электронные и ионные пучки легко фокусируются, их можно развернуть в растр по поверхности образца (сканирующие оже-спектрометры), что позволяет изучать распределение на поверхности образца атомов разл. хим. элементов с высоким пространственным разрешением ( $\sim 30$  нм). Рентг. аэод имеет мин. diam.  $\sim 150$  мкм, сканирующий РОС пока не используется.



Оси. узел оже-спектрометра — энергоанализатор оже-электронов. Чаще всего используют эл.-статич. анализаторы с продольным или поперечным электр. полем (рис. 2). В анализаторах нервого типа направления электр. поля и движения электронов совпадают. К этому типу анализаторов относится многосеточный анализатор с тормозящим полем (рис. 2, а); в нём макс. энергия электронов, попадающих на коллектор анализатора, определяется по задерживающему потенциалу на сетках 3.

В анализаторе второго типа (с дисперсией по энергии) электрон движется в поперечном электр. поле до ок-

ружности, радиус к-рой зависит от его энергии (рис. 2, б, в, г, д). Выделив с помощью диафрагм траекторию опред. радиуса и регистрируя ток электронов, движущихся по этой траектории в зависимости от напряжённости электр. поля (изменяя разность потенциалов

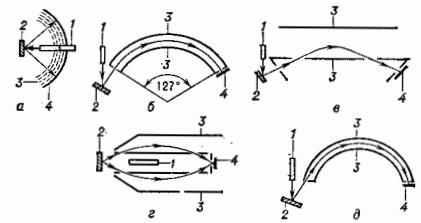


Рис. 2. Энергоанализаторы оже-электронов с продольным (а) и поперечным (б, в, г, д) электрическим полем: а — четырёхсеточный анализатор с тормозящим полем; б — 127-градусный анализатор Юза — Романского; в, г — плоские, цилиндрические зеркала; д — сферический дефлектор. 1 — источник первичных частиц; 2 — образец; 3 — электроды анализатора — сетки (а), цилиндрические (б, в), плоские (г), сферические (д) поверхности; 4 — коллектор электронов — сферический электрод (а) или электронный умножитель (б, в, г, д).

между внеш. и внутр. электродами 3 анализатора), измеряют распределение электронов по энергиям. Из анализатором такого типа относятся, напр., 127-градусный цилиндрич. анализатор Юза — Романского (рис. 2, б), плоское (рис. 2, в), цилиндрическое (рис. 2, г) и сферическое (рис. 2, д) зеркала. Они обеспечивают чувствительность на два порядка выше по сравнению с многосеточным анализатором с тормозящим полем, однако последний позволяет сочетать методы О.-с. с *образцовой медленной электроню*, что даёт возможность наряду с элементным составом приповерхностных слоёв моно-кристаллич. образцов получать сведения об их кристаллич. структуре. Обычно регистрируют не энергетич. распределение числа  $N$  эмитированных электронов по энергиям  $\mathcal{E}$ , а производную  $dN(\mathcal{E})/d\mathcal{E}$  ( $\mathcal{E}$  — энергия электронов), что позволяет не только более чётко выделить линии в оже-спектрах (повысив чувствительность метода), но и более детально анализировать их структуру.

Методами ЗЭС и РОС осуществляют анализ для всех элементов периодич. таблиц, за исключением Н и He. Метод ИОС обладает селективностью: определяет ионы способные возбуждать эмиссию оже-электронов лишь в атомах опред. элементов, что обусловлено механиком обменной генерации вакансий во внутр. электронн. оболочках атомов ионным пучком. Поэтому применение метода ИОС целесообразно, когда необходимо регистрировать наличие на поверхности того или иного элемента, а не проводить полный анализ элементного состава поверхности.

Возбуждённые в твёрдом теле оже-электроны должны «дожить» до энергоанализатора т.е. вылететь, с к-рой они вылетели из эмитирующих их атомов, поэтому необходимо, чтобы, вылетев из атома, они не испытали неупругих взаимодействий. Это возможно лишь в том случае, когда глубина, на к-рой расположено эмитирующий оже-электрон атом, не превосходит ср. diam. свободного пробега  $d$  для неупругого рассеяния; величина  $d$  и определяет толщину приповерхностного слоя, анализируемого методами О.-с. (рис. 3), она составляет

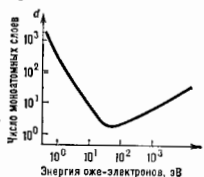


Рис. 3. Зависимость средней глубины  $d$  выхода оже-электронов от их энергии.

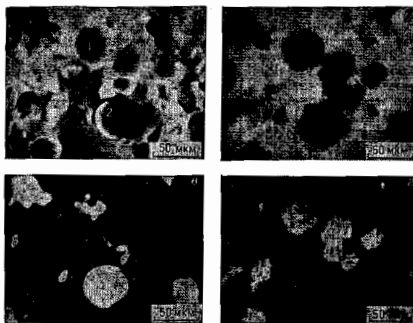


Рис. 4. Изображение границы раздела сплавов Fe — С, полученное с помощью вторичной электронной эмиссии (а), и изображение этой же области, полученное с помощью оже-электронов и характеризующее распределение Fe (б), С (в) и Sb (г) на поверхности образца.

несколько монокристаллических слоев. Поэтому О.с.—афф. метод анализа поверхности (рис. 4, 5). Для получения информации о более глубоких слоях используют послойное распыление исследуемого образца ионами инертных газов.

Вероятность оже-эффекта падает с ростом атомного номера элемента, поэтому эффективность анализа атомов лёгких элементов выше, чем тяжёлых. В табл. приведены характеристики разл. видов О.с.

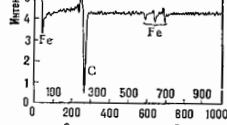


Рис. 5. Оже-спектры, полученные с третера и выстула (отмечены на рис. 4 (а) точками 1 и 2) на поверхности сплава Fe — С, характеризуют различные элементного состава образца в этих точках.

**Характеристики различных видов оже-спектроскопии**

Виды оже-спектроскопии	Ср. глубина анализа, нм	Пространственное разрешение, нм	Анализируемый объём, мкм³	Чувствительность		Погрешность определения состава, %
				%	число атомов	
ЭОС	1—3	50	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>12</sup> —10 <sup>14</sup>	10—25
РОС	1—3	15·10 <sup>4</sup>	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>8</sup> —10 <sup>15</sup>	5—10
ИОС	1—3	60	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>12</sup> —10 <sup>20</sup>	—

В. В. Короблёв.

**ОЖЕ-ЭФФЕКТ** — эмиссия электрона из атома, происходящая в результате безызлучат. перехода при наличии в атоме вакансии на внутр. электронной оболочке. Эффект обнаружил П. Оже (P. V. Auger) в 1925.

Оже-процесс можно разделить на две стадии. Первая — ионизация атома внутр. излучением (рентгено-

ским, быстрыми электронами, понами) с образованием вакансии на одной из внутр. оболочек. Такое состояние атома неустойчиво, и на второй стадии происходит заполнение вакансии электроном одного из вышележащих уровней энергии атома. Выделяющаяся при этом энергия может быть излучена в виде кванта характеристич. рентг. излучения, но может быть передана третьему атомному электрону, к-рый в результате вылетает из атома, т. е. происходит О.-э.

Значения кинетич. энергий  $\epsilon_K$  вылетающих электронов (т. н. оже-электронов) не зависит от энергии частиц внеш. излучения. Значения  $\epsilon_K$  характерны для атомов определ. хим. элемента и равны разности энергий возбуждённых состояний атома:

$$\epsilon_K = \epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3,$$

где  $\epsilon_1$  — энергия ионизов. атома с вакансией на внутр. оболочке,  $\epsilon_2$  — энергия атома после заполнения вакансии одним из электронов атома,  $\epsilon_3$  — пороговая энергия вылета оже-электрона из одноэлектронн. ионизов. атома. Значения  $\epsilon_K$  для разл. атомов и разл. квантовых переходов в них лежат в пределах от 50 до 3000 эВ. Вследствие конечности времени жизни т. возбуждённого состояния атома, ионизованного на первой стадии, существует разброс значений кинетич. энергий оже-электронов:

$$\Delta\epsilon_K = h/\tau \sim 1 \div 10 \text{ эВ.}$$

В оже-процессе с той или иной вероятностью могут принять участие электроны разл. атомных оболочек, поэтому энергетич. спектр вылетающих из атома оже-электронов (оже-спектр) содержит до неск. десятков перекрывающихся между собой оже-линий.

О.-э. происходит не только в изолиров. атомах, но и в молекулах (число оже-линий значительно возрастает), а также в твёрдых телах. В последнем случае наряду с переходами между внутр. уровнями энергии наблюдаются переходы с участием электронов валентной зоны, причём ширина зоны и плотность состояний в ней влияют на форму оже-линий. Изучение энергетич. структуры и осуществление хим. анализа вещества — предмет *оже-спектроскопии*.

Для обозначения оже-переходов применяют правило: если первичная вакансия находилась в электронном К-слое, её заполнение произошло путём перехода электрона из L-слоя, а энергия была передана электрону M-слоя, то оже-электрон наз. KLM-электроном (так же обозначают и соответствующий переход и оже-линию в спектре). Переходы с участием электронов валентной зоны обозначают буквой V (напр., переход LVV).

Особый случай О.-э. представляет собой процесс, при к-ром вакансия заполняется электроном того же электронного слоя (т. е. электроном с тем же главным квантовым числом). Такие переходы (напр., L<sub>1</sub>L<sub>1</sub>M) наз. *нереходами Костера* — Кронига.

В ядерной физике эффект, аналогичный О.-э., когда энергия возбуждённого ядра передаётся одному из атомных электронов, носит назв. внутр. конверсии (см. *Конверсия внутренняя*). В отличие от оже-электронов, кинетич. энергия конверсионных электронов составляет неск. МэВ.

Лит.: Парилис Э. С., Эффект Оже, Таш., 1969; С h a t t e r j i D., The theory of Auger transitions, L. — N. Y., 1976. С. Л. Дударев.

**ОЖИЖЕНИЕ ГАЗОВ** — см. *Сжижение газов*.

**ОККЛЮЗИЯ** (от ср.-век. лат. *occlusio* — запирание, скрывание) — 1) поглощение (растворение) газов твёрдыми телами (обычно металлами) или расплавами, причём газ может образовывать с твёрдыми телами твёрдые или жидкие растворы или хим. соединения (нитриды, гидриды и т. д.); в отличие от *адсорбции*, окклюдированные газы распределяются по всему объёму. 2) Захват растущими кристаллами вещества, в к-ром происходит их рост; в результате О. в кристаллах появляются жидкие или газовые включения.

**ОКОЛОЗВУКОВОЕ ТЕЧЕНИЕ** — течение газа в области, в к-рой скорость потока  $v$  мало отличается от местной скорости распространения звука  $a$  ( $v \approx a$ ). О. т. может быть дозвуковым ( $v < a$ ), сверхзвуковым ( $v > a$ ) и смешанным (или трансзвуковым), когда внутри рассматриваемой области совершается переход от дозвукового к сверхзвуковому течению. Характерными случаями О. т. являются течение в области критического (наб. узкого) сечения сопел ракетных двигателей и аэродинамич. труб, течение вблизи горловины сверхзвуковых воздухозаборников реактивных двигателей, в межлопаточных каналах нек-рых турбомашин, обтекание тел (самолётов, снарядов, ракет), летящих со скоростью, близкой к скорости звука или преодолевающих «звуковой барьер», когда на объектом теле возникают местные сверхзвуковые зоны, замыкающиеся ударными волнами.

В О. т. существ. образом проявляется сжимаемость газа. Аналитическое или численное исследование смешанного О. т. затрудняется тем, что дифференц. ур-ния, описывающие течение газа (напр., в случае *потенциального течения* дифференц. ур-ние в частных производных 2-го порядка для потенциала скорости), принадлежат к эллиптич. типу при  $v < a$ , к параболическому при  $v = a$ , к гиперболическому при  $v > a$ .

Лит.: Франкль Ф. И., Избранные труды по газовой динамике, М., 1973, разд. 3. С. Л. Вышневецкий.

**ОКСИДЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ** — оксидные соединения с высокой критич. темп-рой  $T_c$  перехода в сверхпроводящее состояние. Обнаружение *сверхпроводимости* в этих соединениях (1986—88) существенно повысило уровень известных значений  $T_c$  от  $\approx 24$  К в  $Nb_3Ge$  до  $\approx 120$  К в  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ , что значительно выше темп-ры кипения жидкого азота ( $T_{кип} = 77,3$  К) — дешёвого и доступного хладагента.

Исключит. значением прикладных аспектов сверхпроводимости и отсутствие принципиальных теоретич. ограничений на  $T_c$  (по меньшей мере, до  $T_c$  порядка 300 К) делают проблему создания сверхпроводящих материалов с высокой критич. темп-рой важнейшей задачей физики сверхпроводимости. После открытия в 1911 сверхпроводимости Х. Камерлинг-Оннесом (Н. Kamerlingh-Onnes) доминировала тенденция к поиску новых сверхпроводников среди простых металлов (Hg, Pb, Nb), затем среди двойных ( $Nb_3Sn$ ,  $Nb_3Ga$ ) и тройных [ $Nb_3(Al, Ge)$ ] интерметаллоидов (рис. 1). Поиск сверхпроводников среди оксидных соединений был затруднён из-за психологически, поскольку большинство таких соединений является диэлектриками. В 1964 в США

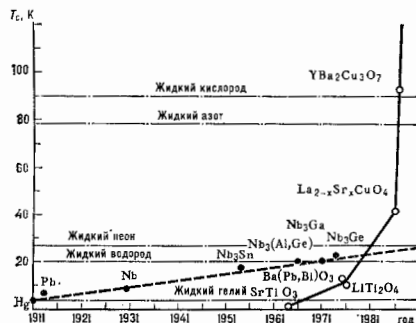


Рис. 1. Рекордные значения  $T_c$  металлических и интерметаллических (пунктир), металлооксидных (штрихованная линия) сверхпроводников. Штрих-пунктирные линии соответствуют температурам кипения жидкого азота, кислорода.

было открыто первое оксидное сверхпроводящее соединение со структурной перовскита —  $SrTiO_3$  с  $T_c = 0,3 - 0,5$  К при концентрации электронов  $10^{19} - 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. В 1974—75 обнаружена сверхпроводимость у  $LiTi_2O_4$  ( $T_c = 41$  К) и у  $VaPb_{1-x}Bi_xO_3$ , в к-ром критич. темп-ра менялась с составом и достигала макс. значения  $T_c = 13$  К при  $x = 0,25$ , а концентрация электронов была достаточно низкой (ок.  $2 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>). В 1986 Й. Г. Беджори (J. G. Bednorz) и К. А. Мюллер (K. A. Müller) обнаружили сверхпроводимость с  $T_c \approx 30 - 34$  К в многофазной керамике  $La - Ba - Cu - O$ . Оказалось, что за сверхпроводимость в этой системе ответственно соединение  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  с макс. значением при  $x = 0,15 - 0,20$ . Возможна замена Ba на Sr. В соединении  $La_{1-x}Sr_xCuO_4$   $T_c = 36$  К. В 1987 получена кера-

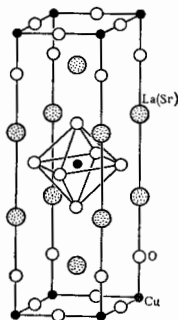


Рис. 2. Кристаллическая структура соединений  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ .

мика  $Y - Ba - Cu - O$  с критич. темп-рой  $T_c = 92$  К. Сверхпроводимость в этой системе связана с соединением  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , где  $\delta$  — доля вакансий по кислороду. В 1988 синтезированы висмутные и таллиевые соединения ( $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ ,  $T_c \approx 140 - 120$  К).

О. в. с. являются соединениями с ионно-ковалентной связью и дефектной по кислороду перовскитоподобной кристаллич. структурой с упорядоченным расположением кислородных вакансий. Для О. в. с. характерна сравнительно высокая подвижность кислорода в кристаллич. решетке — при нагревании резко увеличивается дефектность по кислороду  $\delta$ . Сверхпроводящие свойства О. в. с. существенно зависят от содержания кислорода. На примере  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и  $La_2CuO_{4-x}$  можно утверждать, что существует оптим. концентрация кислорода, при к-рой достигается макс. критич. темп-ра.

Наиб. хорошо изучены соединения  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ ,  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . «Исходное» соединение  $La_2CuO_4$  имеет ромбическую элементарную ячейку и является антиферромагн. диэлектриком с точкой Нееля  $T_N \approx 240$  К, сильно зависящей от концентрации кислорода. Замена La на Sr (Ba, Ca) приводит к стабилизации тетрагональной фазы (структурный тип  $K_2NiF_4$ , рис. 2). Одноврем. с этим уменьшается  $T_N$  и начальная с  $x = 0,05$  антиферромагн. переход полностью подавляется и появляется сверхпроводимость с макс. значением  $T_c \approx 40$  К при  $x = 0,15 - 0,20$ .

Как и  $La_2CuO_4$ , соединение  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с познж. содержанием кислорода ( $\delta = 0,6 - 1,0$ ) представляет собой антиферромагн. диэлектрик. При уменьшении дефектности по кислороду  $T_N$  быстро снижается от  $T_N \approx 400$  К ( $\delta = 0,85$ ) до нуля ( $\delta \approx 0,6$ ), соединения с  $\delta < 0,6$  становятся сверхпроводниками ( $T_c \approx 92$  К при  $\delta = 0 - 0,1$ ). Область существования высокотемпературной сверхпроводимости на фазовых диаграммах в координатах темп-ра — состав непосредственно примыкает к линии, отвечающей переходу диэлектрик — металл. Вблизи этой же линии происходит переход антиферромагнетик — немагнитный металл и структурный переход.

Если для структуры  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  характерно наличие слоёв кислородных октаэдров, центрированных катионами меди и сросшихся друг с другом через общие ионы кислорода (рис. 2), то в соединении  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  кислородные октаэдры за счёт создания упорядоченных вакансий кислорода трансформированы в пирамиды и

квадраты (рис. 3). В результате в  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  существуют медь-кислородные плоскости и цепочки.

На примере сверхпроводящих соединений в системах  $Tl - Ba - Ca - Cu - O$  и  $Bi - Sr - Ca - Cu - O$  установлена связь между характером чередования

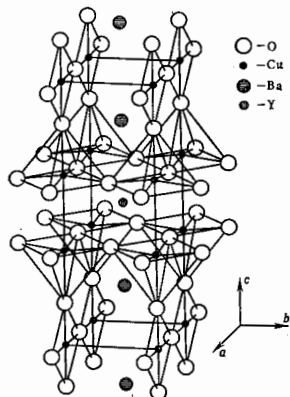


Рис. 3. Кристаллическая структура соединений  $YBa_2Cu_3O_x$ .

медь-кислородных плоскостей и значением  $T_c$  (рис. 4): «прислаивание» плоскостей  $Cu - O$  плоскостями  $Ca$  увеличивает до предел. предела значение критич. темп-ры. Наличие удвоенных слоев  $Cu - O$  с металлич. проводимостью является для О. в. с. фактором, способствующим повышению  $T_c$ . В качестве исключения на это эмпирич. правила можно назвать соединение  $Ba_{1-x}K_xVIO_3$  ( $T_c = 30$  К), не содержащее медь и имеющее кубич. решетку типа перовскита.

Для электрич. свойств О. в. с. в нормальном состоянии типичен линейный рост сопротивления с изменением темп-ры. Квазидвумерная слоистая структура О. в. с. проявляется в сильной анизотропии ферми-поверхности, электрических и сверхпроводящих свойств. Измерение коэф. Холла и Зеебека указывает, что носителями заряда в большинстве О. в. с. являются дырки (см. *Зеебека эффект, Холла эффект*), хотя имеются соединения и с электронным типом проводимости (напр.,  $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$ ,  $T_c = 24$  К). О. в. с. — соединения, производные от родственных им оксидных систем, таких как  $La_2CuO_4$  и  $YBa_2Cu_3O_6$ . Это антиферромагн. диалектрики типа Мотта — Хаббарда (см. *Моттовские диалектрики*), в к-рых одноцентровые кулоновские электрон-электронные корреляции приводят к расщеплению на верхнюю и нижнюю хаббардовские зоны меди (см. *Хаббарда модель*). Кислородная зона находится в

энергетич. зазоре между ними. Возможно и перекрытие кислородной зоны с нижней хаббардовской зоной меди. Уровень Ферми располагается вблизи потолка кислородной зоны, при этом реализуется ситуация типа «дырки» — на кислороде, локальные магн. моменты — на меди. Замещение  $La$  на  $Sr$  или варьирование концентрации кислорода приводит к созданию дырок в кислородной зоне.

О. в. с. — *сверхпроводники второго рода* с сильной анизотропией 1-го и 2-го критич. полей, глубины проникновения магн. поля  $\lambda$ , критического тока  $I_c$ , длины когерентности  $\xi$  (табл.).

Характеристики некоторых оксидных высокотемпературных сверхпроводников

	Поле параллельно слою $Cu - O$		Поле перпендикулярно слою $Cu - O$		$T_c$
	$H_{c2}(0), T_A$	$\xi_{  }(0), \text{Å}$	$H_{c2}^{\perp}(0), T_A$	$\xi_{\perp}(0), \text{Å}$	
$(La_{1-x}Sr_x)_2CuO_4 \dots$	83	74	6	5	38
$YBa_2Cu_3O_x \dots$	140	35	28	7	92
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_x \dots$	270-400	34-40	21-29	2-3	85

Сама сверхпроводимость связана с проводящими слоями  $Cu - O$ , а роль остальных элементов сводится фактически к удержанию нужной кристаллич. структуры. В частности, в  $YBa_2Cu_3O_x$  замена  $Y$  на любой трехвалентный редкоземельный элемент, в т. ч. и магнитный, практически не сказывается на значении  $T_c$ . В результате соединения  $RBa_2Cu_3O_x$ , с  $R - Nd, Sm, Gd, Dy, Er$  переходит в антиферромагн. состояние соответственно при  $T = 0,52; 0,61; 2,25; 0,90; 0,60$  К без разрушения самого сверхпроводящего состояния, т. е. указанные О. в. с. относятся к классу антиферромагн. сверхпроводников (см. *Магнитные сверхпроводники*).

В  $YBa_2Cu_3O_x$  длина когерентности поперек слоев  $Cu - O$  ( $\xi_{\perp}$ ) несколько меньше расстояния между слоями, однако сверхпроводимость является трехмерной. В  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$   $\xi_{\perp} \approx 2-3\text{Å}$  уже значительно меньше расстояния между слоями  $Cu - O$ , и сверхпро-

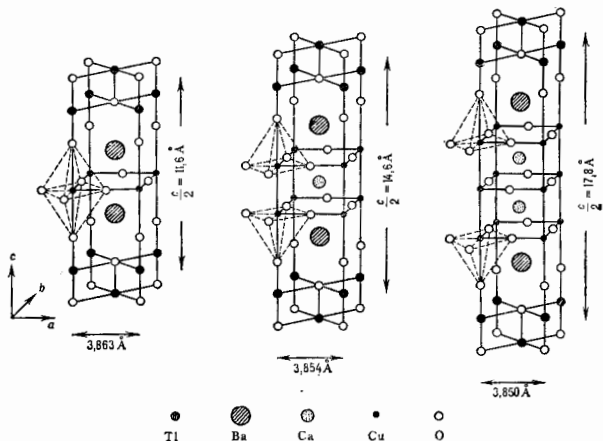


Рис. 4. Кристаллическая структура таллиевых (висмутовых) оксидных сверхпроводников: слева —  $TlBa_2CuO_7$  ( $Bi_2Sr_2CuO_2$ ), в центре —  $TlBa_2CaCu_2O_7$  ( $Bi_2Sr_2CaCu_2O_2$ ), справа —  $TlBa_2Ca_2Cu_2O_7$  ( $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_2O_2$ ).



волимости, по-видимому, является квазидвумерной. Параметр  $2\Delta/kT_c = 4-10$  ( $\Delta$  — энергетическая щель, измеренная в экспериментах по одночастотному туннелированию), что выше, чем величина 3,5, предсказываемая теорией Бардина — Куэра — Шриффера (БКШ) (см. Бардина — Куэра — Шриффера модель). При  $T = T_c$  наблюдается скачок теплоемкости, либо соответствующий в теории БКШ образованию куперовских пар, либо (аналогично переходу к жидкому  $^4\text{He}$  в сверхтекучее состояние) отвечающий бозе-конденсации пар, уже существующих выше  $T_c$ .

Существует большое число теоретич. моделей, в к-рых делаются попытки объяснить природу высокотемпературной сверхпроводимости в О. в. С. В моделях с фононным механизмом образования электронных пар высокая критич. темп-ра связывается либо с резким усилением электрон-фононного взаимодействия, либо с наличием особенностей в плотности электронных состояний. Во мн. моделях используется модифицированный экситонный и обменный механизм сверхпроводимости.

Лит.: Проблема высокотемпературной сверхпроводимости, под ред. В. Л. Гинзбурга, Д. А. Киришица, М., 1977; Г и в у р г в Л. И. Киришица и Д. А. Киришица, Высокотемпературная сверхпроводимость (обзор теоретических предсказаний), «УФН», 1987, т. 133, с. 578; Б е л о з е р И. Г., М ю л л е р К. А., Оксиды перовскитного типа — новый подход к высокотемпературной сверхпроводимости, «УФН», 1988, т. 156, с. 323; Высокотемпературные сверхпроводники, пер. с англ., М., 1988, в. В. Мошалаков.

**ОКТАВА** — единица частотного интервала, равная интервалу между двумя частотами ( $f_1$  и  $f_2$ ), логарифм отношения к-рых (при основании 2)  $\log_2(f_2/f_1) = 1$ , что соответствует  $f_2/f_1 = 2$ ; 1 октава = 1200 центов = = 304 савар. Применяется в акустике.

**ОКУЛЯР** (от лат. *oculus* — глаз) — часть оптич. системы (зрительной трубы, микроскопа и т. п.), обращенная к глазу наблюдателя и предназначенная для увеличения и рассматривания действ. изображения, созданного объективом или объективом совместно с *оборачивающей системой*. Если увеличенное изображение проектируется на экран или фотоматериал, то иногда используется термин «проеционный О.». Для наблюдения изображения зрачок глаза наблюдателя необходимо совместить с выходным зрачком О. Благодаря наличию *полевой диафрагмы*, расположенной в передней фокальной плоскости О., наблюдаемое изображение четко ограничено.

Осн. оптич. характеристики О.: видимое увеличение  $\Gamma = \text{tg}\alpha'/\text{tg}\alpha$ , где  $\alpha$  — угол, под к-рым наблюдался бы предмет в отсутствие О.,  $\alpha'$  — угол, под к-рым видно изображение того же предмета; видимое увеличение О. связано с его фокусным расстоянием  $f'$  соотношением  $\Gamma = 250/f'$  (250 — расстояние наилучшего видения); угол  $\omega$  в о л е  $2\omega'$  — угол, под к-рым наблюдатель видит полевую диафрагму О.; угол  $\omega$  О. составляет  $\sim 20^\circ$  в О. микроскопов и  $90^\circ-100^\circ$  у широкоугольных О. зрительных труб; у д а л е и е (с расстоя-

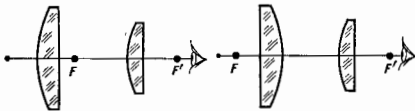


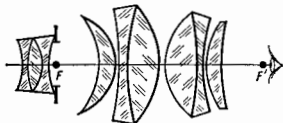
Рис. 1. Двухлинная полонитальная окуляры: слева — окуляр Гюйгенса; справа — окуляр Рамсдена.

ние) выходного зрачка от наружной поверхности последней линзы О. — определяется удобством работы наблюдателя и составляет  $\sim 7$  мм у О. микроскопов и  $\sim 70$  мм у О. оружейных прицелов.

Кол-во используемых в оптич. системе О. линз зависит от величины угла поля и соотношения между удалением выходного зрачка и фокусным расстоянием. Про-

стейшие и широко используемые окуляры Гюйгенса и окуляр Рамсдена состоят всего из двух плоско-выпуклых положительных линз (рис. 1). Широкоугольные О. (рис. 2) состоят из 7—8 линз.

Рис. 2. Схема многолинзового широкоугольного окуляра.



Допустимые погрешности изготовления линз О. значительно больше, чем у объективов, это позволяет использовать в О. асферические, в осн. параболические, поверхности и т. о. сократить число линз.

Лит. см. при ст. Объектив. А. П. Грамматин. **ОЛОВО** (Stannum), Sn, — хим. элемент побочной подгруппы IV группы периодич. системы элементов, ат. номер 50, ат. масса 118, 710. Природное О. состоит из смеси 10 стабильных изотопов:  $^{112}\text{Sn}$ ,  $^{114}\text{Sn}$ — $^{120}\text{Sn}$ ,  $^{122}\text{Sn}$  и  $^{124}\text{Sn}$ ; наиб. распространенные —  $^{118}\text{Sn}$  (32,59%) и  $^{119}\text{Sn}$  (24,22%), наименее —  $^{115}\text{Sn}$  (0,36%). Электронная конфигурация внеш. оболочек  $5s^2 5p^2$ . Энергии последоват. ионизации 7,344; 14,63; 30,50; 40,73 эВ соответственно. Металлич. радиус 0,158 нм, радиус иона  $\text{Sn}^{2+}$  0,093 нм, иона  $\text{Sn}^{4+}$  0,071 нм. Значение электроотрицательности 1,8.

В свободном виде О. — серебристо-белый металл. Известны 3 модификации О.: ниже  $13,12^\circ\text{C}$  устойчива  $\alpha$ -модификация, обладающая кубич. структурой типа алмаза (пост. решетки  $a = 0,65043$  нм;  $c$  серого О.); выше  $13,2^\circ\text{C}$  устойчива  $\beta$ -модификация с тетрагональной решеткой ( $a = 0,58312$  нм,  $c = 0,31844$  нм; «белое О.»); при темп-ре  $173-231,84^\circ\text{C}$  существует  $\gamma$ -Sn с ромбич. кристаллич. структурой. Переход  $\beta \rightarrow \alpha$  сопровождается резким уменьшением плотности, в результате чего металл расширяется в серый порошок. Скорость перехода максимальна при  $-33^\circ\text{C}$ ; переход  $\beta \rightarrow \alpha$  ускоряется при появлении на «белом» О. пылянок (зародышки «серого» О. (оловянная чума)). Плотность  $\alpha$ -Sn 5,846 кг/дм $^3$ ,  $\beta$ -Sn 7,295 кг/дм $^3$  (при 20 $^\circ\text{C}$ );  $t_{\text{пл}}$  —  $231,91^\circ\text{C}$  (по темп-ре плавления О. часто калибруют термомарк),  $t_{\text{кип}}$  —  $2620^\circ\text{C}$  (по др. данным,  $2270^\circ\text{C}$ ), теплота плавления 7,19 кДж/моль. Темп-ра Дебая 200 К ( $\beta$ -Sn) и 212 К ( $\alpha$ -Sn). Темп-ра перехода в сверхпроводящее состояние 3,722 К. Уд. электр. сопротивление 0,128 мОм·м (при 293 К). Термич. коэф. сопротивления  $4,5 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$  (при 273—293 К). О. парамагнитно, уд. магн. восприимчивость  $0,312 \cdot 10^{-9}$  ( $\alpha$ -Sn при 280 К) и  $0,026 \cdot 10^{-9}$  ( $\beta$ -Sn при 293 К). Коэф. теплового линейного расширения  $26,2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  (при 273—373 К), теплопроводность 65—60 Вт/м·К (при 293—373 К). Модуль нормальной упругости 55 ГПа (при 0 $^\circ\text{C}$ ), модуль сдвига 16,8—18,1 ГПа. Тв. по Бриггелю литого О. 49—51 МПа (при 20 $^\circ\text{C}$ ), деформированного — 75 МПа. Выше  $170^\circ\text{C}$  О. становится хрупким.

В хим. соединениях обычно проявляет степени окисления +2 и +4. При комнатной темп-ре О. устойчив к действию воздуха, пресной воды, разбавленных растворов слабых органич. кислот. Коррозия О. под действием кислот при нагревании резко усиливается. О. применяется для защиты металлов от коррозии (лужение), оно входит в состав разл. сплавов: бронз (с Cu), латуней (с Sn и Zn), баббитов (с Sb), циркаллоев (с Zr). Высокоочищенное О. используют в вакуумноэлектронной технике, соединения О. — в люминофорах.  $^{119}\text{Sn}$  применяется в мессбауэровской спектроскопии. Из искусственно получаемых радионуклидов О. наиб. значение имеет  $\gamma$ -радиоактивный  $^{115m}\text{Sn}$  ( $T_{1/2} = 293$  сут).

С. С. Берковский.

**ОМА ЗАКОН** — линейная связь между силой тона  $I$  на участке элктр. цепи и приложенным к этому участ-

ку напряжением  $U$  (интегральная форма О. з.) или между плотностью тока  $j$  и напряженностью электрич. поля в проводнике (дифференц. форма О. з.).

О. з. в интегральной форме установлен в 1826 Г. Омом (G. Ohm):

$$U = RI, \quad (1)$$

где  $R$  — коэф., зависящий от материала проводника, его геометрии, темп-ры и называемый омическим сопротивлением или просто сопротивлением. Соотношение (1) описывает участок электрич. цепи в отсутствие источников *электродвижущей силы*. Чтобы в замкнутой системе проводников (электрич. цепи) мог течь стационарный ток, в этой системе должны быть участки, где действуют электрич. поля неэлектростатич. происхождения. Эти участки наз. источниками эдс. Если  $\mathcal{E}$  — эдс, действующая в неразветвленной цепи, то вместо (1) имеем

$$\mathcal{E} + U = RI, \quad (2)$$

где  $R$  — полное сопротивление замкнутой цепи, включающее внутр. сопротивление источника эдс. Это соотношение из О. з. для замкнутой цепи. Обобщение (2) на случай разветвлённых цепей см. в ст. *Кирхгофа правила*.

О. з. обобщается на случай переменных (меняющихся во времени) гармонич. закону квазиэлектронных токов и электрич. цепей, содержащих наряду с омическим (или, как говорят в таких случаях, активным) сопротивлением ещё и электрич. ёмкости  $C$  и индуктивности  $L$ . В этом случае удобно записывать связи между силой тока  $I$  и напряжением  $U$  в комплексной форме, понимая под истинными значениями этих величин  $ReI$  и  $ReU$  соответственно. Введение комплексного сопротивления, или *импеданса*,

$$Z = R + i(\omega L - \frac{1}{\omega C}), \quad (3)$$

приводит к О. з. для цепи переменного тока:

$$U = ZI$$

[напряжения и ток зависят от времени по закону  $\exp(i\omega t)$ ]. Мнимая часть в ф-де (3) наз. реактивным сопротивлением. Правила Кирхгофа остаются в силе и для цепи, включающей наряду с активным (омическим) и реактивным сопротивлениями; при этом вместо омических сопротивлений участка цепи следует подставить соответствующих импеданс.

О. з. в дифференциальной форме записывается в виде

$$j = \sigma E, \quad (4)$$

где коэф. пропорциональности  $\sigma$  наз. *электропроводностью*. О. з. в интегральной форме может быть получен из соотношения (4), если проинтегрировать последнее по объёму рассматриваемого проводника и учесть, что  $E = -\nabla\phi$  и напряжение на участке  $AB$  есть  $U = \phi(B) - \phi(A)$ . Коэф.  $R$  и  $\sigma$  связаны соотношением (для цилиндрич. проводников)

$$R = l/S\sigma,$$

где  $l$  — длина проводника,  $S$  — площадь его поперечного сечения.

Линейная связь между  $j$  и  $E$  в проводнике обусловлена линейной зависимостью эфф. силы трения, действующей на носители заряда, от их скорости. Микроскопич. определение плотности тока  $j = \sum ev$ , где  $e$  — заряд носителя,  $v$  — его скорость (суммирование производится по всем носителям заряда, находящимся в единице объёма проводника). Если при движении носителя на него действует сила трения, линейно зависящая от скорости (как это имеет место при жидком трении), то  $v = \alpha E$  и, следовательно,  $\sigma = \sum e\alpha e^+$ ; коэф.  $\alpha$  наз. *подвижностью носителей* заряда. Отклонения от О. з. практически всегда обусловлены изменением плотности и ср. времени свободного пробега носителей при изменении электрич. поля (полупроводники, газовый разряд). В полуметалле висмуте отклонения от О. з. имеют место при плотностях тока выше, чем  $(0,5-1) \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> (Е. С. Боровик, 1953). В металлах отклонений от О. з. не наблюдалось, хотя для ряда металлов (медь, платина, вольфрам) экспериментально проверена область вольтов до  $(5-6) \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>.

При наличии в проводнике сил неэлектрич. происхождения, вызывающих ток (т. н. сторонние силы), в (4) под  $E$  следует понимать сумму напряженностей электрич. поля и поля сторонних сил,  $E \rightarrow E + E_{стор}$  (напр., в случае неоднородного поля темп-ры  $E_{стор} \sim \nabla T$ ).

В анизотропных проводниках (монокристаллах, проводниках в магн. поле) направления  $j$  и  $E$  в общем случае не совпадают, однако сохраняется линейная связь между компонентами  $j$  и  $E$ :

$$j_i = \sum_k \sigma_{ik} E_k,$$

где  $\sigma_{ik}$  — тензор проводимости;  $i, k = 1, 2, 3$ .

О. з. (4) записан для неподвижных (относительно наблюдателя) проводников. Для движущихся со скоростью  $u$  ( $|u| \ll c$ ) проводников вместо (4) следует писать

$$j = \sigma E' = \sigma \left( E + \frac{[u]B}{c} \right), \quad (5)$$

где  $E' = E + [u]B/c$  — электрич. поле в собств. системе проводника,  $E$  и  $B$  — электрич. и магн. поля в системе наблюдателя. Релятивистское обобщение (5) в векторном виде можно записать так:

$$j + \frac{u([u] - \rho c^2)}{c^2 - u^2} = \sigma E' = \sigma \frac{E + [u]B/c}{\sqrt{1 - (u/c)^2}},$$

где  $\rho$  — плотность заряда в системе наблюдателя,  $E' = (E + [u]B/c)/\sqrt{1 - (u/c)^2}$  — электрич. поле в собств. системе проводника.

О. з. для плазмы может иметь вид, отличный от (4) (см. *Ома обобщённый закон*).

Лит.: Саваева В. В. Курс общей физики, 2 изд., т. 2, М., 1982; Парселл Ф. Электричество и магнетизм, пер. с англ., 2 изд., М., 1983; Сивухин И. Д. В. Общий курс физики, 2 изд., т. 3 — Электричество, М., 1983; Ахиз С. З. и А. И., Ахиз В. З. и И. А. Электромагнетизм и электромагнитные волны, М., 1985. А. И. Ахмезер, И. А. Ахмезер, **ОМА ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН** — линейная зависимость для плазмы между плотностью тока  $j$  и напряженностью эфф. электрич. поля  $E_{эфф}$ , включающего объёмные силы неэлектрич. происхождения (т. н. сторонние силы), вызывающие ток. О. о. з. записывается в дифференц. форме.

Для волюности моноизованной двухкомпонентной плазмы, находящейся в магн. поле  $H$ , О. о. з. в стационарном случае имеет вид

$$\frac{j_{\parallel}}{\sigma_{\parallel}} + \frac{j_{\perp}}{\sigma_{\perp}} = E' - \frac{v_{T1}}{en} - \frac{R}{e} \equiv E_{эфф}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\parallel} = e^2 n_0 / 51 m_e v_{T1}$ ,  $\sigma_{\perp} = e^2 n / m_e v_{T1}$  — соответственно продольная и поперечная проводимости плазмы,  $m_e$  — масса электрона,  $v_{T1}$  — частота его соударений с ионом,  $E' = E - [u]H/c$  — электрич. поле в собств. системе плазмы, движущейся со скоростью  $u \ll c$ ,  $n_0$  — ионное давление,  $n$  — концентрация плазмы,  $R$  — термсила, обусловленная градиентом темп-ры плазмы  $T$ :

$$R = 0,71 v_{T1} T + \frac{3v_{T1} m_e c}{2eH} [H \nabla_{\perp} T].$$

О. о. з. в форме (1) выполняется при условии, что пространственные масштабы неоднородности тока существенно превосходят дебаевский и ларморовский радиусы частиц плазмы.

В часто встречающейся ситуации, когда градиенты давления и темп-ры плазмы имеют одинаковое направление, нормальное магн. полю  $H$ , электрич. поле  $E'$  естеств. образом разделяется на три компонен-

ты  $E_{11}$ ,  $E'_{11}$  и  $E'_{12}$ . При этом из (1) выделяются «продольный» и «поперечный» законы Ома:

$$i_z = \sigma_e E_z, \quad i_r = \sigma_i \left( E'_{11} - \frac{3v_{gr} m_e c}{2e^2 H^2} [H \nabla_{\perp} T] \right),$$

а градиент поперечного давления уравновешивается холловским полем  $E'_{12} = \nabla_{\perp} p_i / e n_i$  (см. Холла эффект).

Для нестационарных процессов, характерные времена  $\tau$ -рых значительно больше обратных величин ионной циклотронной и ленгмювской частот, соотношение (1) обобщается добавлением в левую часть слагаемого  $(m_e e^2 n) \partial j / \partial t$ .

В слабоионизованной плазме дополнит. вклад в плотность тока даёт сила трения между заряж. компонентами и нейтральной составляющей. В моноферной плазме при расчёте НЧ-процессов учитывать также вклад силы тяжести. Для трёхкомпонентной ионосферной плазмы (электроны, один сорт ионов и один сорт нейтралов), пренебрегая различием между продольной и поперечной проводимостями и термосилой, О. о. з. обычно записывают в виде

$$\frac{m_e n_e v_j}{e^2 n_e} + \frac{m_e}{e^2 n_e} \frac{\partial j}{\partial t} = E' - \frac{\sigma_p n_i}{e n_e} + \frac{m_i}{e c} g + \frac{m_e}{e} (v_{en} - v_{in})(u - u_n), \quad (2)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести,  $u_n$  — скорость движения нейтральной составляющей,  $v_{en}$ ,  $v_{in}$  — частоты соударений с нейтралами соответственно электронов и ионов,  $v_e = v_{en} + v_{ei} + m_e v_{in} / m_i$  — полная частота соударений электронов, определяющая время передачи их импульса тяжёлым частицам  $\tau_e = 1/v_e$ .

Соотношения (1) и (2) справедливы при малых плотностях тока, когда плазму можно считать линейной проводящей средой. При больших плотностях тока развиваются нелинейные режимы и необходимо учитывать индукционные в плазме нелинейные токи. Напр., для слаболинейных дрейфовых волн в бесстолкновительной плазме нелинейное обобщение соотношения (1) имеет вид

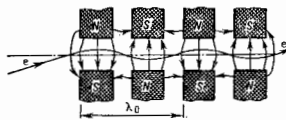
$$j = \frac{cT}{H} [h \nabla_{\perp} n] + \frac{m_e n^2}{H^2} \left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{c}{H} [Eh] \nabla_{\perp} \right) E_{\perp},$$

где  $h$  — единичный вектор, направленный вдоль магн. поля  $H$ .

Лит.: Альвен Х., Фельдхаммар К.-Г., Космическая электродинамика, пер. с англ., 2 изд., М., 1967; Фрэнк-Камеи и сики Д. А., Лекции по физике плазмы, 2 изд., М., 1968; Грановский В. Л., Электрический ток в плазме, М., 1971; Голянт В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И. Е., Основы физики плазмы, М., 1977.

**ОНДУЛЯТОР** (франц. *ondulateur*, от *onde* — волна), устройство, в к-ром создаются эл.-магн. поля, действующие на движущиеся в нём заряды, частицы с периодич. силой, удовлетворяющей условию: среднее за период значение силы равно нулю. Движущаяся заряд. частица, попадая в О., совершает периодич. колебат. движение и испускает *ондуляторное излучение*. Заряд. частицу в О. можно считать возбуждённым *осциллятором*, движущимся равномерно и прямолинейно. Набл. распространённые траектории заряд. частицы — синусоиды и спирали.

Схема ондулятора со знакопеременным магнитным полем. Траектория заряд. частицы (электрона  $e$ ) лежит в плоскости, перпендикулярной рисунку.  $\lambda_0$  — длина периода траектории частицы.



По виду создаваемых полей О. делятся на два типа. В О. 1-го типа поля периодически изменяются в пространстве или во времени (знакопеременное магн. поле (рис.), втяговое магн. поле, ВЧ-электрич. поле, поле

эл.-магн. волны и т. д.). В О. 2-го типа действуют статич. фокусирующие магн. и электрич. поля (однородное магн. поле, скрещенные однородные электрич. и магн. поля, квадруольное электрич. поле и т. д.). Длина периода траектории частицы в О. 1-го типа задается периодом поля О. и в релятивистском случае не зависит от её энергии. В О. 2-го типа длина периода траектории частицы определяется фокусирующими свойствами полей (градиентом, величиной), амплитудой колебания частицы (задается углом и координатой её вхождения в О.), энергией частицы. О. делят также на статические (постоянные во времени электрич. и магн. поля) и динамические (быстро изменяющиеся во времени эл.-магн. поля).

Природные О. — кристаллы. Усреднённое внутрикристаллич. электрич. поле является фокусирующим для заряд. частицы (см. *Канализирующие заряженные частицы*) и в то же время — периодич. ф-цией расстояния, отсутствующего вдоль прямой, пересекающей кристаллографич. плоскости. Поэтому, если угол и координата вхождения частицы в кристалл таковы, что она пересекает кристаллографич. плоскости, то кристалл подобен О. 1-го типа. Длина периода траектории частицы в этом случае определяется межплоскостным расстоянием и углом между вектором ср. скорости частицы и кристаллографич. плоскостями. Если же пач. условия таковы, что частицы попадают в режим плоскостного или осевого канализования, то кристалл подобен О. 2-го типа.

О. нашли широкое применение: они могут служить источниками ондуляторного излучения, использоваться в *лазерах на свободных электронах*, в быстродействующих системах индикации протонных пучков высоких энергий, в системах управления параметрами пучков заряд. частиц, использующих фокусирующие свойства О. и радиач. трение частиц, возникающее при испускании ими ондуляторного излучения. О. могут использоваться в масс-сепараторах хим. элементов и их изотопов, в ондуляторных линейных ускорителях заряд. частиц, в ондуляторных группирователях пучков заряд. частиц. Комбинации О. 1-го и 2-го типов (напр., О. с втягивным и с соленоидальным магн. полями) могут использоваться в масс-спектрографах, системах ввода ионов в магн. ловушки, в системах, создающих регулируемый угл. разброс пучков частиц. Во мн. установках может оказаться целесообразным применение О. с плавно меняющимися параметрами — длиной периода траектории частицы, величинами магн. и электрич. полей и т. д. В таком О. можно, напр., добиться увеличения времени резонансного взаимодействия частиц с эл.-магн. волной, расширения диапазона частот спектра синхротного ондуляторного излучения.

В О. с переменным магн. полем могут использоваться как пост. магниты с чередующимися знаками полюсов (рис.), так и электромагниты. В О. на основе электромагнитов, представляющих собой две спиралы, сдвинутые друг относительно друга на половину шага намотки и питаемые противоположно направленными токами, создаются винтовые (циркулярно поляризуемые) магн. поля; такие О. наз. спиральными. Комбинируя спиральные О. с одинаковым и разным направлением намотки обмоток, с одинаковым и разным шагом намотки и регулируя токи в обмотках, можно оперативно изменять величину магн. поля О. и вид его поляризации (изменять циркулярно поляризованное магн. поле на линейное или эллиптическое, а также создавать совокупности циркулярно поляризованных полей с разл. направлениями вращения и разными периодами). Такими методами можно генерировать ондуляторное излучение с разл. свойствами на основной и на высших гармониках.

В О., используемых в источниках ондуляторного излучения (генерация ондуляторного излучения на высших гармониках), в ондуляторных линейных электронных, протонных, ионных ускорителях, в масс-се-

параторах и т. д., часто необходимо создавать магн. поля большой напряжённости. В этих случаях перспективно использование в них обычных и высокотемпературных сверхпроводников, что позволяет получать значения напряжённости магн. полей  $\sim 10^8 - 10^9$  Э.

Лит.: А л е к с е в В. И., В е с с о в о в В. Г., О способах генерирования циркулярно поляризованного электромагнитного излучения на ускорителях и накопителях заряженных частиц, в сб.: Труды 6-го Всесоюзного совещания по использованию синхротронного излучения, СИ-84, Новосибир., 1984; см. также лит. при ст. *Обдуляторное излучение*. Е. Г. Вессово.

**ОБДУЛЯТОРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** — эл.-магн. излучение равномерно и прямолинейно движущихся *осцилляторов*, в частности излучение заряд. частиц в *обдуляторе*.

Источники О. и. состоят из ускорителя или накопителя частиц (чаще электронов) и одного или неск. обдуляторов. Пучки заряд. частиц в источниках О. и. могут испускать спонтанное некогерентное, спонтанное когерентное и индуцированное О. и.

Скорость частицы в обдуляторе можно представить в виде суммы скоростей: постоянной  $v$ , и периодической переменной  $\Delta v(t + T) = \Delta v(t)$  ( $T$  — период колебаний частицы в обдуляторе,  $t$  — время). Одночастотная ускоренная частица, пройдя через обдулятор, испускает пуч. эл.-магн. волн, длительность  $k$ -рого  $\Delta t$  зависит от угла  $\theta$  между  $v$  и направлением наблюдения. На расстояниях  $R \gg K\lambda_0$  ( $\lambda_0$  — длина периода траектории частицы в обдуляторе,  $K$  — число периодов)

$$\Delta t = \frac{K\lambda_0}{c\beta_1} (1 - \beta_1 \cos\theta),$$

где  $\beta_1 = v/c$ . Испущенный частицей пучок содержит  $K$  периодов, и, следовательно, круговая частота осн. гармоник О. и.  $\omega_1 = 2\pi K/\Delta t$ . В общем случае пучи волн О. и. на интервале  $\Delta t$  не являются гармоническими и излучение происходит на неск. гармониках, кратных основной. Частоты  $\omega_n$   $n$ -й гармоник определяют в соответствии с *Доплера эффектом* ф-лой

$$\omega_n = \frac{n\Omega}{1 - \beta_1 \cos\theta}, \quad (*)$$

где  $\Omega = 2\pi f_0/c\lambda_0$  — частота колебаний частицы в обдуляторе. При  $\theta = 0$  частоты О. и. максимальны. Вследствие конечной длительности пучков О. и., испускаемое частицей в нек-ром направлении, распределено в интервале частот  $\Delta\omega_n$ ,  $n$ -рый определяет относительную еств. ширину спектральной линии

$$\frac{\Delta\omega_n}{\omega_n} \approx \frac{1}{nK}.$$

При  $K \gg 1$  О. и., наблюдаемое под заданным углом  $\theta$ , монохроматично и имеет частоту, соответствующую (\*). Осв. часть энергии, испускаемой релятивистской частицей, сосредоточена вблизи направления её мгновенной скорости  $v$  в узком диапазоне углов

$$\Delta\varphi \approx \frac{mc^2}{e} = \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{1}{\gamma},$$

где  $e$  — значения энергии частицы,  $m$  — её масса,  $\beta = v/c$ ;  $\gamma$  — релятивистский фактор частоты.

Вектор  $v$  изменяет своё направление относительно  $v$  в нек-ром диапазоне углов  $\alpha_m$ . Если  $\alpha_m \approx 1/\gamma$ , то частица при движении в обдуляторе излучает в основном в направлениях, близких к направлению  $v$ , в диапазоне углов  $\Delta\theta \approx 1/\gamma$ . С увеличением  $\alpha_m$  растёт усорение частиц  $\varphi$ , а следовательно, и полная интенсивность О. и. При  $\alpha_m > 1/\gamma$  О. и. испускается в больший диапазон углов:  $\Delta\theta \sim \alpha_m$ .

В направлении наблюдения, определяемом единичным вектором  $n$ , излучение испускается эффективно только в том случае, когда мн. угол между  $n$  и  $v$  не превышает  $1/\gamma$ . Величина спектральной плотности потока энергии О. и., испускаемого частицей в направлении  $v$ , на первой гармонике, достигает макс. значения при  $\alpha_m \approx 1/\gamma$  (условие оптимальной генерации). При  $\alpha_m > 1/\gamma$  число гармоник О. и. с ростом  $\alpha_m$  резко ( $\sim \alpha_m^3$ ) возрастает, что приводит к расширению его

спектра и сдвигу в более коротковолновую (жёсткую) область. При  $\alpha_m \gg 1/\gamma$  спектр О. и. становится близким к спектру *синхротронного излучения*.

Источники О. и. всех типов обладают важными преимуществами перед источниками синхротронного излучения, лазерами и др. источниками ИК- и оптич. диапазонов — возможностью плавно регулировать частоту излучения путём изменения величин магн. поля обдулятора и энергии заряд. пучка. В ультрарелятивистском случае ( $\gamma \gg 1$ ) выражение (\*) можно привести к виду

$$\omega_n = \frac{2\pi n \Omega \gamma^2}{1 + \alpha^2 + \beta^2},$$

где  $\alpha^2 = \overline{H^2}/H_0^2$ ,  $\theta = \theta\gamma$  ( $\overline{H^2}$  — среднеквадратичное значение напряжённости магн. поля,  $H_0 = \frac{2\pi mc^2}{e\lambda_0} \approx 10700/\lambda_0$  — нек-рое характерное его значение).

Уширение спектральной линии, интенсивность и степень поляризации спонтанного О. и., а также коэф. усиления индуцированного О. и. зависят от величин углового ( $\Delta\theta$ ) и энергетического ( $\Delta e/e$ ) разбросов пучка частиц; эти величины должны удовлетворять условию

$$\Delta\theta \leq \frac{1}{\gamma\sqrt{nK}}, \quad \frac{\Delta e}{e} \leq \frac{1}{nK}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_1^2}}.$$

Характеристики обдуляторного излучения зависят также от формы пучка частиц, неоднородностей поля обдулятора и его типа.

**Спонтанное некогерентное О. и.** В источниках такого излучения частицы пучка излучают независимо друг от друга. Фазы эл.-магн. волн, испускаемых разл. частями пучка, являются случайными ф-циями времени. Интенсивность излучения таких источников  $I_{\text{нк}}$  пропорц. току  $i$  пучка частиц:

$$I_{\text{нк}} = \frac{2r^2}{3c^3} K^3 \lambda_0^3 \overline{H^2} \gamma^2 i,$$

где  $r_0 = e^2/mdc^2$  — классич. радиус частицы,  $e$  — её заряд.

Поток  $d n_{\text{ф}}/dt$  эквивалентных фотонов О. и. (поток полной  $t$ ,  $e$  усреднённой по углам, энергии фотонов, делённый на макс. энергию одного фотона), испускаемых электронами в обдуляторах с непоперными гармонич. полями, в условиях оптимальной генерации равен

$$\frac{d n_{\text{ф}}}{dt} \approx \frac{\alpha K i}{e},$$

где  $\alpha = e^2/hc \approx 1/137$ . В этих условиях при  $K = 10^8$  один электрон, пройдя через обдулятор, испускает один фотон; пучок электронов при  $i = 6,1$  А создаёт поток  $d n_{\text{ф}}/dt = 6 \cdot 10^{17}$  фотонов/с независимо от энергии частиц.

Возможности источников спонтанного некогерентного О. и. можно рассмотреть на примере источника, в к-ром используется обдулятор и пучок частиц с параметрами:  $\lambda_0 = 3$  см,  $\sqrt{\overline{H^2}} = 3000$  Э,  $\alpha_m \approx \sqrt{\alpha^2} \approx 1$ ,  $i = 0,1$  А; если при этом  $e = 1$  ГэВ и 10 ГэВ, то энергия фотонов составляет ок. 150 эВ и 15 кэВ, а интенсивность О. и. — 35 Вт и 3,5 кВт соответственно. Источники О. и. с такими параметрами целесообразно создавать на основе синхротронов и накопителей электронов, в ирридиальных промежуточных к-рых устанавливаются обдуляторы. В этом случае достигается высокая эффективность источников за счёт многократного прохождения частиц через обдулятор: электроны, потеряв энергию на излучение, восстанавливают её при движении в ускоряющем резонаторе синхротрона (накопителя) и затем вновь попадают в обдулятор.

Спонтанное О. и. может применяться в тех же областях исследования, что и синхротронное излучение: в рентг. микроскопии, рентг. структурном анализе, атомной и молекулярной спектроскопии, спектроскопии кристаллов, рентг. литографии, медицине и др. По

сравнению с синхротронным излучением оно обладает более высокими интенсивностью, направленностью, степенью монохроматичности и поляризации.

Обычно длина периода траектории частицы в ондуляторе  $\lambda_0 \geq 1$  см, т. е. она должна быть больше его апертуры, определяемой поперечными размерами пучка ( $\geq 1$  мм). Более жесткое излучение (с энергией квантов  $h\nu_{\text{макс}} \approx e$ ) при меньшей эффективности генерации испускается в ондуляторе с  $\lambda_0 < 1$  см. Такими ондуляторами могут служить, напр., эл.-магн. волны (обратный Комптона эффект) и кристаллы. Кристаллы устанавливаются на краю рабочей области синхротрона, на выходе линейных ускорителей электронов, а также в электронных каналах протонных синхротронов. Поляризов. пучки фотонов, испускаемые электронами в поле поляризованной эл.-магн. волны или в кристалле (когерентное тормозное излучение, каналированное излучение), используются в ядерной физике и физике высоких энергий.

Спонтанное когерентное О. и. В источниках такого излучения используют пучок частиц, предварительно сгруппированный (сбачиванный) в густки длиной  $l \lesssim \lambda_{\text{г}} = 2lc/\omega_{\text{г}}$ , находящийся друг от друга на расстоянии  $\lambda_{\text{п}}$ , равном или кратном  $\lambda_{\text{п}}$ . Их интенсивность

$$I_{\text{кор}} = N_1 S I_{\text{нр}},$$

где  $N_1 = i\lambda_{\text{п}}/ec$  — число частиц в одном густке пучка,  $S \leq 3$  — интегральный фактор когерентности излучения, определяющийся размерами, угл. и энергетич. разбросом пучка частиц, степенью его группировки, величиной нелинейности поля ондулятора. Осн. часть интенсивности сосредоточена в диапазоне частот и углов

$$\Delta\omega/\omega \lesssim \min(1/nK, 1/M),$$

$$\Delta\psi_{\text{кор}} \lesssim \min(1/\gamma\sqrt{nK}, \lambda_{\text{п}}/r_{\text{н}}),$$

где  $M$  — число густков пучка,  $r_{\text{н}}$  — поперечные размеры пучка.

Частицы в ондуляторе можно использовать в качестве активной среды лазеров. В источниках спонтанного когерентного О. и. плотность излучающих частиц — осн. параметр активной среды — в общем случае промодулирована в пространстве координат и импульсов, поэтому такие источники наз. также параметрич. лазерами на свободных электронах (ЛЭС). Фазы эл.-магн. волн, испускаемых частицами пучка в источниках спонтанного когерентного О. и., коррелированы между собой, а интенсивность  $\sim I^2$ , поэтому их называю также ЛЭС на сверхизлучении.

Совр. техника группирования пучков позволяет осуществлять генерацию когерентного О. и. с  $\lambda \geq 1$  мм. С применением резонаторов можно увеличить интенсивность источников спонтанного когерентного О. и. в  $Q$  раз, где  $Q$  — добротность резонатора. Источники спонтанного когерентного О. и. с хорошо сгруппиров. пучками частиц позволяют получить предельно возможные характеристики излучения.

Индцированное О. и. В источниках такого излучения используют однородные по плотности пучки частиц. В ондуляторе вместе с пучком подается внеш. эл.-магн. волна. Частицы однородного пучка равновероятно попадают как в тормозящие, так и в ускоряющие фазы волны. Именит энергии частиц, находящихся в противофазах, равны по величине, но противоположны по знаку, поэтому частицы начинают двигаться в разл. продольных скоростях и группируются в густки. Если нач. энергия частиц пучка выше некой равновесной энергии, то они группируются в тормозящих фазах волны (поперечная составляющая вектора скорости электрона, определяемая в основном полем ондулятора, направлена под острым углом к вектору напряженности элктрич. поля волны), отдают ей свою кинетич. энергию и поэтому усиливают её.

Интенсивность эл.-магн. излучения, выходящего из источника индцирующ. О. и., пропорц. величине

$$|E_B + E_{\text{п}}|^2 = |E_B|^2 + 2|E_B E_{\text{п}}| + |E_{\text{п}}|^2,$$

где  $E_B$  — напряженность элктрич. поля усиливаемой волны,  $E_{\text{п}}$  — напряженность элктрич. поля, создаваемого сгруппированными в густок частицами пучка. Вклад индцирующ. О. и. пропорционален  $2|E_B E_{\text{п}}|$ . О. и. распространяется в той же области пространства и обладает теми же характеристиками, что и усиливаемая волна. Член  $|E_{\text{п}}|^2$  соответствует спонтанному когерентному О. и. источника, и при  $|E_{\text{п}}|^2 \gg 2|E_B E_{\text{п}}| \gg |E_B|^2$  (режим больших коэф. усиления) генерируется в основном спонтанное когерентное О. и. Роль внеш. волны в этом случае сводится к «защатке», группирующей пучок. Большие коэф. усиления и большие эффективности излучения источников, осуществляемые, как правило, с использованием в них ондуляторов с переменными параметрами (период траектории частиц, амплитуда магн. поля), характерны для ондуляторных усилителей (лазерных усилителей на свободных электронах, основанных на ондуляторах). Режим генерации индцирующ. О. и. достигается введением в источник О. и. резонаторов, аэралк и др. элементов, позволяющих осуществить обратную связь между излучением и излучающей системой.

Источники спонтанного некогерентного О. п. могут испускать излучение в широком диапазоне частот — от ИК- до гамма-излучения. Такое О. и. может обладать достаточно высокими монохроматичностью ( $\Delta\omega/\omega \approx 1/K \approx 10^{-2} - 10^{-3}$ ) и длиной когерентности  $l_{\text{кор}} = c\Delta t = K\lambda_1 \approx (10^2 - 10^3)\lambda_1$ , степенью поляризации  $\sim 100\%$ , вид к-рой можно изменять в ходе эксперимента. Излучение можно оперативно перестраивать по частоте в широких пределах (в неск. раз). Мощность таких источников растёт с уменьшением  $l$  и достигает значений  $P \sim 1$  кВт (при  $l \sim 0,1$  мм). Параметр вырождения (плотность числа фотонов в одной моде) источников спонтанного некогерентного О. и. в оптич. диапазоне длин волн может на 3–4 порядка превышать параметр вырождения тепловых источников и достигать значений  $\approx 1$  а с уменьшением длины волны надет по степенному, а не по экспоненциальному (как для тепловых источников) закону.

Источники спонтанного некогерентного О. и. на основе накопителей излучили широкое распространение. На накопителе можно устанавливать неск. ондуляторов, а на каждом канале О. и. — неск. установок для разл. исследований. Источники спонтанного когерентного и индцированного О. и. для ИК- и оптич. диапазонов длин волн также базируются как на существующих электронных ускорителях, так и на специализован. ускорителях и накопителях для таких источников. Теория, эксперим. исследования и первый опыт эксплуатации показали, что ондуляторные источники расширяют область использования когерентного излучения.

Идея генерации спонтанного О. и. впервые была высказана и обоснована В. Л. Гинзбургом в 1947. Теоретически было показано, что О. и. должно обладать рядом преимуществ перед синхротронным излучением: монохроматичностью в заданном направлении, более высокой спектральной плотностью потока энергии излучения. Была предложена схема источника, в к-ром частицы пучка проходят многократно через ондулятор, двигаясь по замкнутой траектории в магн. системах типа синхротронов с примольнейшими промежутками. Дальнейшее развитие теории О. и. получили в работах Г. Мотца (H. Motz) (1951–53). Им на основе линейных ускорителей были построены первые источники спонтанного когерентного О. и., исследованы свойства О. и. этих источников. Визуально наблюдались цветная радужная картина О. и. в оптич. диапазоне, согласующаяся с теоретич. моделью полученной зависимостью частоты от угла  $\theta$ . Уникальные возможности

источников спонтанного некоррелированного О. и были продемонстрированы в 1977—78 на синхротронах в Флор. ин-те АН СССР и Томском политехн. ин-те. В 1958—59 Р. Такссон (R. Twiss), Моцем, Р. Пантелло (R. Pantell), Шнайдером (J. Schneider) и А. В. Гаповым-Греховым начали обосновать фаз. процессы в источниках индуктор. О. и. Первые такие источники были созданы и исследованы на длине волны  $\lambda \approx 40$  см [1960, Р. М. Филлипс (Phillips)]. В 1977 Дж. Мейдси (Meady) с сотрудниками продемонстрировал работу таких источников в ИК-диапазоне на Стэнфордском линейном ускорителе электронов.

Лит.: Синхротронное излучение и его применения, 2 изд., М., 1985; Бессонов Е. Г., К теории параметрических лазеров на свободных электронах, «Квантовая электроника», 1986, т. 13, № 8, с. 1617; е то же, «О пространственно-временной когерентности синхротронного излучения», «Изв. АН УССР», 1988, т. 98, в. 3, с. 498 (библ.); Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках. Сб. ст., под ред. В. М. Лопухина, М., 1987; Аленксисе в В. И. (и др.), Параметрический лазер на свободных электронах на основе микроскопии, «Изв. АН УССР», 1989, т. 306, № 3, с. 580; Бессонов Е. Г., Виноградов А. В., Ондулаторы и лазерные источники мягкого рентгеновского излучения, «ФФН», 1989, т. 159, с. 143; Ондулаторное излучение. Лекции на свободных электронах, «Труды ФИАН», 1991, т. 214.

**ОНСАГЕРА ГИПОТЕЗА** — состоит в том, что временная эволюция флуктуации данной физ. величины в равновесной термодинамич. системе происходит в среднем по тому же закону, что и макроскопич. изменение соответствующей переменной. Высказана Л. Онсагером (L. Onsager) в 1931 и послужила ему основой для разработки термодинамики неравновесных процессов. Вывод *Онсгера теоремы* о симметрии кинетич. коэффициентов опирается на эту гипотезу и симметрию ур-ний движения частиц относительно *обращения времени*.

Напр., если в системе, находящейся в состоянии термодинамич. равновесия, произошла локализованная в пространстве флуктуация темп-ры, то, согласно О. г., в среднем она будет затухать со временем, следуя ур-нию теплопроводности. Аналогично флуктуация гидродинамич. скорости будет затухать по ур-нию Навье — Стокса.

Лит.: Термодинамика необратимых процессов. Лекции в легкой международной школе физики им. Э. Ферми, пер. с англ., М., 1962; Гроу с С. де, М. азу р. П., Неравновесные термодинамика, пер. с англ., М., 1984; О л а к е т Л., Взаимосвязи relations in irreversible processes, pt 1—2, «Phys. Rev.», 1931, в. 37, р. 405, в. 38, р. 2265. Д. Н. Зубарев.

**ОНСАГЕРА ТЕОРЕМА** (принцип Онсгера) — одна из осн. теорем термодинамики неравновесных процессов, устанавливающая свойства симметрии кинетических коэффициентов. Доказана Л. Онсагером в 1931. Кинетич. коэф.  $L_{ik}$  определяют как коэф. в линейных соотношениях между термодинамич. силами  $X_k$  и потоками  $J_i$ :  $J_i = \sum_k L_{ik} X_k$ , причём скорость изменения энтропии (производство энтропии) равно  $\sigma = \sum_i J_i X_i$ .

Согласно О. т.,  $L_{ik} = L_{ki}$  в отсутствие магн. поля и вращения системы как целого. Если на систему действует внеш. магн. поле  $H$  или она вращается с угл. скоростью  $\omega$ , то

$$L_{ik}(H) = L_{ki}(-H), \quad L_{ik}(\omega) = L_{ki}(-\omega).$$

Эти соотношения симметрии наз. соотношениями в асимметрии Онсгера.

О. т. устанавливает связь между кинетич. коэф. при перекрёстных эффектах, описывающих влияние термодинамич. силы  $X_k$  на поток  $J_i$  и термодинамич. силы  $X_i$  на поток  $J_k$  при  $i \neq k$ , напр. связь между коэф. термоэлектрич. и коэф. Дюфура эффекта — явления, обратного термодиффузии.

О. т. является следствием микроскопич. обратимости ур-ний механики, т. е. инвариантности ур-ний движения относительно обращения времени (замены  $t \rightarrow -t$ ). Инвариантность относительно обращения времени означает, что при изменении направлений скоростей  $v$  всех частиц на обратные и одновременно изменения направлений  $H$  и  $\omega$  частицы будут двигаться в обратном

направлении по своим прежним траекториям. Изменение направлений  $H$  и  $\omega$  необходимо потому, что иначе при замене  $v \rightarrow -v$  сила Лоренца и сила Корiolиса, пропорциональные  $[Hv]$  и  $[v\omega]$ , изменили бы свои направления на обратные.

Онсгер рассмотрел также общий случай, когда отклонение системы от термодинамич. равновесия определяется параметрами  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ , симметричными и антисимметричными относительно обращения времени. Термодинамич. силы равны  $X_i = \partial \Delta S / \partial \alpha_i$ ,  $Y_i = \partial \Delta S / \partial \beta_i$ , где  $\Delta S$  — отклонение энтропии от равновесного значения; потоки равны  $J_i = d\alpha_i/dt$ ,  $I_i = d\beta_i/dt$ . При малом отклонении системы от термодинамич. равновесия имеют место линейные феноменологич. соотношения между  $X_i$ ,  $Y_i$  и  $J_k$ ,  $I_k$ :

$$d\alpha_i/dt = \sum_k L_{ik}^{\alpha} X_k + \sum_k L_{ik}^{\beta} Y_k \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

$$d\beta_i/dt = \sum_k L_{ik}^{\alpha} X_k + \sum_k L_{ik}^{\beta} Y_k \quad (i = 1, 2, \dots, m).$$

В этом случае соотношения Онсгера принимают вид

$$L_{ik}^{\alpha\alpha}(H, \omega) = L_{ki}^{\alpha\alpha}(-H, -\omega), \quad L_{ik}^{\alpha\beta}(H, \omega) = L_{ki}^{\beta\alpha}(-H, -\omega),$$

$$L_{ik}^{\beta\beta}(H, \omega) = -L_{ki}^{\beta\beta}(-H, -\omega),$$

а скорость изменения энтропии описывается линейным выражением относительно потоков и термодинамич. сил, входящих в феноменологич. соотношения:

$$d\Delta S/dt = \sum_i J_i X_i + \sum_i Y_i I_i.$$

Доказательство О. т. основано на термодинамич. теории флуктуаций с использованием гипотезы о характере их затухания и свойствах микроскопич. обратимости. О. т. справедлива также для векторных и тензорных потоков, причём для тензорных кинетич. коэф. соотношения Онсгера таковы:  $L^{\alpha\beta}(H, \omega) = -L^{\beta\alpha}(-H, -\omega)$ , где  $L$  — матрица, транспонированная к  $L$ . При линейном преобразовании потоков и термодинамич. сил соотношения Онсгера для новых кинетич. коэф. сохраняются, если преобразование оставляет неизменным производство энтропии.

В статистич. теории необратимых процессов получают выражения для кинетич. коэф. в виде временных корреляц. ф-ций потоков (см. Грина — Кубо формулы), из к-рых с учётом микроскопич. обратимости непосредственно следуют соотношения взаимности Онсгера.

Лит. см. при ст. Термодинамика неравновесных процессов, Онсгера гипотеза.

**ОПАЛЕСЦЕНИЕ КРИТИЧЕСКАЯ** — резкое усиление рассеяния света чистыми веществами в критических состояниях, а также растворами жидкостей или газами при достижении ими критических точек. О. к. объяснена в 1907 М. Смолюховским (M. Smoluchowski), показавшим, что при критич. темп-ре сжимаемость вещества сильно возрастает, в связи с чем энергия теплового движения его частиц становится достаточной для «внезапного» сильного увеличения числа микроскопич. флуктуаций плотности. В результате этого среда, практически прозрачная при темп-рах выше и ниже критической, в критич. состоянии становится мутной средой.

**ОПЕРАТОР** в математике, см. Линейный оператор.

**ОПЕРАТОРНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ** — представление произведений неск. локальных операторов, определённых в разл. точках пространства-времени, в виде суммы отд. локальных операторов.

В квантовой теории поля (КТП) из-за сигнатурного поведения Грина функций на малых расстояниях возникает трудность при построении локальных составных операторов на произведений гейзенберговских полей (см. Гейзенберга представление)  $\phi(x)$  ( $x$  — точка

пространства-времени). В теории свободных полей для этой цели используется понятие нормального произведения (обозначается: ...). Напр., для случая скалярного поля локальными операторами являются  $\phi(x)$ ;  $\phi^2(x)$ ;  $\phi^2(x)\partial_\mu\phi(x)$ ; и т. д. ( $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ ,  $\partial_\mu \equiv \partial/\partial x^\mu$ ). Общий рецепт для построения локальных составных операторов, справедливых как для свободных, так и для взаимодействующих полей, даёт О. р. Вильсона [1]:

$$A(x)B(y)|_{x=y} = \sum_n C_n(x-y)O_n(x), \quad (1)$$

где  $A(x)$ ,  $B(y)$  и  $O_n(x)$  — локальные операторы,  $C_n(x-y)$  — коэффициентные ф-ции, являющиеся обобщением ф-ции Грина.

Величина  $C_n(x)$  содержит сингулярности типа  $(-x^2 + i\epsilon x_0)^{-P_n}$ , где добавка  $i\epsilon x_0$  ( $\epsilon \rightarrow +0$ ) необходима для того, чтобы матричный элемент от левой части соотношения (1) удовлетворял правильным спектральным свойствам (см. *Спектральное представление*), вытекающим из положительности энергии для всех промежуточных состояний. Показатели степени  $P_n$  могут быть выражены через размерности  $\Delta_i$  (в единицах массы) операторов  $A$ ,  $B$  и  $O_n$  по ф-ле  $P_n = \frac{1}{2}(\Delta_A + \Delta_B - \Delta_n)$ , где  $\Delta_i = d_i + \gamma_i$ ,  $d_i$  — канонич. размерности операторов,  $\gamma_i$  — их аномальные размерности.

О. р. (1) справедливо во всех порядках теории возмущений в перенормируемых моделях КТП (см. *Перенормируемость взаимодействий*). В теории возмущений размерности полей равны каноническим ( $\gamma_i = 0$ ), а коэффициентная ф-ция  $C_n(x)$  помимо степени  $(-x^2 + i\epsilon x_0)^{-P_n}$  содержит в виде множителя полюсы по  $\ln(-x^2)$ . Гл. вклад в сумму (1) при  $x \rightarrow y$  вносит оператор с мин. размерностью, среди  $k \rightarrow y$  самыми важными являются единичный оператор  $I$  ( $d_I = 1$ ), сохраняющиеся (точно или приближённо) токи  $j_\mu(x)$  ( $d_j = 3$ ) и тензор энергии-импульса  $\theta_{\mu\nu}(x)$  ( $d_\theta = 4$ ). При учёте взаимодействий размерность операторов  $I$ ,  $j_\mu$  и  $\theta_{\mu\nu}$  не меняется. Из этого, в частности, следует, что матричный элемент от хронологического произведения (T) двух эл.-магн. токов по вакуумному состоянию

$$\langle 0|T(j_\mu(x)j_\nu(x))|0\rangle \quad (*)$$

при  $x \rightarrow 0$  ведёт себя так же, как в свободной теории. Сечение  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны,  $k$ -рое определяется мнимой частью этого матричного элемента в *импульсном представлении*, при больших энергиях (в системе центра инерции)  $\sqrt{s}$  пропорционально  $\alpha^2/s$  (где  $\alpha \approx 1/137$  — постоянная тонкой структуры), что согласуется с экспериментом. Поправки к вакуумному среднему (\*), возникающие из-за операторов  $O_n(x)$  с более высокими размерностями  $O_1(x) = G^2(x)$ ,  $O_2(x) = -[\psi(x)\psi(x)]^2$ , где  $\psi(x)$ ,  $G_{\mu\nu}(x)$  — кварковое и глюонное поля,  $\Gamma$  — нек-рая матрица (черта над  $\psi$  означает дираковское сопряжение), приводит к вкладам

$$\sim \frac{\alpha^2}{s} \left( C_1 \frac{\langle 0|O_1(0)|0\rangle}{s^2} + C_2 \frac{\langle 0|O_2(0)|0\rangle}{s^2} \right),$$

нарушающим масштабную инвариантность сечения  $e^+e^-$ -аннигиляции [2].

Существует другая версия ф-лы (1), а именно: О. р. произведения двух операторов на световом конусе

$$A(x)B(0) \Big|_{\substack{x^2 \rightarrow 0 \\ x \sim 1/m}} = \sum_{n,k=1}^{\infty} C_n^k(-x^2)x_1 x_2 \dots x_n O_{n,k}^k \dots (0), \quad (2)$$

где, как и ранее, для простоты предполагается, что  $A(x)$  и  $B(0)$  являются скалярными по отношению к Лоренца преобразованиям ( $m$  — характерная масса адрона,  $O_{n,k}^k$  — нек-рый тензорный оператор,  $\mu_i = 0, 1, 2, 3$ ).

Для классификации локальных операторов удобно ввести понятие твиста. Твист тензора  $O_{\mu_1 \dots \mu_n}^k(x)$  равен по определению разности его размерности  $\Delta_n$  и спина  $S_n$ . Гл. вклад в разложение (2) дают операторы, имеющие мин. значение твиста; при этом их спины и моменты могут быть произвольными. Напр., для операторов, билинейных по кварковым полям, мин. твист (два) имеет выражение  $O_{\mu_1 \dots \mu_n} = S\psi\psi_{\mu_1} \dots \psi_{\mu_n}$ , где символ  $S$  означает симметризацию по всем лоренцевым индексам и выделение следов. В квантовой хронодинамике (КХД) для обеспечения калибровочной инвариантности следует в  $O_{\mu_1 \dots \mu_n}$  заменить все производные на ковариантные:  $\partial_{\mu_i} \rightarrow \partial_{\mu_i} - igA_{\mu_i}$  (здесь  $A_{\mu_i}$  — потенциал глюонного поля,  $g$  — константа взаимодействия в КХД). В силу асимптотической свободы и ренормализационной группы коэффициентные ф-ции  $C_n^k(-x^2)$  в ф-ле (2) ведут себя при  $x^2 \rightarrow 0$  как

$$(-x^2 + i\epsilon x_0)^{\gamma(d_n - d_n - d_n - S_n - S_n)} [\ln(x^2 \mu^2)]^{\sigma_n},$$

где  $c_n$  — числа,  $k$ -рые могут быть найдены в рамках теории возмущений. О. р. на световом конусе (2) используется, в частности, для нахождения логарифмич. и степенных эффектов нарушения масштабно-инвариантного поведения *структурных функций* лептон-адронных *глубоко неупругих процессов* [3].

О. р. является эфф. способом вычисления и классификации разл. вкладов в физ. амплитуды процессов и находит широкое распространение в приложениях КТП. Возможности применения ф-л (1), (2) в адронной физике связаны с тем, что вид коэффициентных ф-ций  $C_n^k$ , как правило, может быть установлен с помощью теории возмущений, независимо от специфики сильного взаимодействия, после чего сравнение матричных элементов по физ. адронным состояниям от левой и правой частей равенства (1) [или (2)] приводит к соотношениям между физ. амплитудами.

Строгое доказательство О. р. пока существует только в рамках теории возмущений для простых перенормируемых моделей КТП [4].

Лит.: W I l s o n K. G., Non-Lagrangian models of current algebra, Phys. Rev. D, 1969, 2) S h i f f m a z M. A., V a i n s h t e i n A. I., Z a k h a r o v V. I., QCD and resonance physics. Theoretical foundations, eNucl. Phys. B, 1979, v. 147, p. 385; 3) G r o s s D. J., W i l c z e k F., Asymptotically free gauge theories, ePhys. Rev. D, 1974, v. 9, p. 980; 4) З а в а н о в О. И., Перенормированные диаграммы Фейнмана, М., 1979.

Л. Н. Литовтов

**ОПЕРАТОРЫ** в квантовой теории — символы, изображающие составленные по определенным правилам матем. операций (алгебраич., дифференциальных, интегральных, перестановочных и т. д.), используемых в квантовой теории для преобразования встречающихся в ней величин. Если состояние квантовой системы описывается с помощью волновой ф-ции  $\psi(t, x)$  (для конкретности, напр., в Шредингера представлении), то О. или их последовательность в конечном счёте действуют на эту ф-цию, сопоставляя с ней волновую ф-цию, соответствующую уже др. состоянию системы. В др. формулизмах квантовой теории (напр., когда состояние системы фиксируется с помощью О. матрицы плотности или в представлениях, когда  $\psi$  является фиксир. вектором в *гильбертовом пространстве*) О. действуют на др. О., характеризующие состояние системы или к.-л. её характеристики. Ниже будут рассмотрены наиб. часто встречающиеся типы О.

**Операторы динамических величин**

**Общие положения.** В соответствии с осн. принципами квантовой механики (в линейной относительно ф-функции теории) каждой физ. величине  $F$  ставится в соответствие линейный самосопряжённый О.  $\hat{F}$ , преобразующий ф-функцию в новую, но принадлежащую тому же классу ф-цию  $\psi'$ ,  $\hat{F}\psi = \psi'$  (где  $f$  — число). Если  $\psi$  задана в виде разложения  $\psi(t, x) = \sum_n \Phi_n(t)\psi_n(x)$

но заранее выбранным базисным ф-циями  $\{\psi_n(x)\}$  (определяющим конкретное представление как волновой ф-ции, так п действующих на неё  $O$ ), т. е. задана как вектор  $\Phi(t) = \{\Phi_n(t)\}$  в бесконечномерном гильбертовом пространстве, то действие  $O$  в  $\hat{F}$  приводит помимо умножения на число  $f$  к повороту вектора  $\Phi$  в этом пространстве, а изменение его компонент  $\Phi_n \rightarrow \Phi'_n$  — к перераспределению квантовомеханич. вероятностей  $|\Phi_n(t)|^2$  обнаружить систему в каждом из состояний, характеризующихся  $\psi_n(x)$ . Ф-ции  $\psi$  и  $\psi'$  считаются нормированными на 1, т. е. вне зависимости от наличия штриха

$$\int \psi^*(x,t)\psi(x,t)dx = \sum_n |\Phi_n(t)|^2 = 1.$$

С каждым  $O$  в квантовой механике связывается ур-ние  $\hat{F}\psi_n(x) = f_n\psi_n(x)$ , определяющее его собств. значения  $f_n$  и полную систему ортонормированных собств. ф-ций  $\psi_n$ , подчинённых определённым граничным и всем необходимым общим для  $\psi$ -функций условиям. Совокупность величин  $\{f_n\}$  определяет спектр возможных значений физ. величины  $F$ , а система ф-ций  $\{\psi_n\}$  (каждая из к-рых характеризует состояние, в к-ром эта величина имеет значение  $f_n$ ) может служить базисом пространства, в к-ром представляются все др. состояния системы.

Требование линейности  $O$ .

$$\hat{F}(c_1\psi_1 + c_2\psi_2) = c_1\hat{F}\psi_1 + c_2\hat{F}\psi_2$$

(где  $\psi_1$  и  $\psi_2$  — волновые ф-ции двух возможных состояний системы,  $c_1$  и  $c_2$  — числа) можно рассматривать как выражение *суперпозиции состояний принципа* в квантовой механике, условие же самосопряжённости оператора  $\hat{F}$  обеспечивает действительность квантовомеханич. ср. значений физ. величин  $F$ , к-рые определяются как

$$\bar{F} = \int \psi^*(x)\hat{F}\psi(x)dx,$$

где  $\psi(x)$  — волновая ф-ция состояния, для к-рого определяется ср. значение  $F$ , а  $\psi^*(x)$  — её комплексно сопряжённая величина (если  $\psi$  — многокомпонентная ф-ция, то вместо  $\psi^*$  здесь стоит эрмитово сопряжённая ф-ция  $\psi^\dagger$ ). Определяя  $O$  в  $\hat{F}$ , транспонированный по отношению к исходному с помощью соотношения

$$\int \psi_1^*\hat{F}\psi_2dx = \int \psi_2^*\hat{F}^\dagger\psi_1dx,$$

можно записать условие самосопряжённости  $O$  в виде  $\hat{F}^\dagger = \hat{F}$ , где  $\hat{F}^\dagger = (\hat{F}^T)^*$ . В случае, когда система находится в одном из состояний  $\psi_n$ , ср. значение  $\bar{F}$  автоматически совпадает с собств. значением  $f_n$ . Более того, ур-ние, определяющее собств. ф-ции и собств. значения  $O$  в  $\hat{F}$ , математически эквивалентно обращению в нуль квантовомеханич. дисперсии (не только квадратичной, но и любого порядка) величин  $F$ :  $(\Delta F)^2 = (F - \bar{F})^2 = 0$  для состояний  $\psi$ , совпадающих с любым из  $\psi_n$ . В связи с этим говорят, что в рамках квантовомеханических представлений измерение физ. величины  $F$  может привести только к к.-л. из значений  $f_n$ .

Алгоритм действия с  $O$  определяются согласно ф-лам

$$(\hat{F} + \hat{G})\psi = \hat{F}\psi + \hat{G}\psi, \quad (\hat{F}\hat{G})\psi = \hat{F}(\hat{G}\psi).$$

Деление на  $O$  определяется с помощью введения обратного  $O$  в  $\hat{F}^{-1}$ , такого, что  $\hat{F}^{-1}\hat{F} = \hat{F}\hat{F}^{-1} = I$ , где  $I$  означает  $O$  умножения на единицу, причём  $\hat{F}^{-1}\psi_n = f_n^{-1}\psi_n$  для  $f_n \neq 0$ . Если  $O$  в  $\hat{F}$  выступает в качестве аргумента нек-рой ф-ции  $\mathcal{F}(\xi)$ , то  $\mathcal{F}(\hat{F})$  понимается как разложение этой ф-ции в формальный сте-

пенный ряд, в к-ром вместо степеней  $\xi$  стоят соответствующие степени  $O$ :  $\hat{F}$ ,

$$\mathcal{F}(\hat{F}) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left( \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \xi} \right)_{\xi=0} (\hat{F})^k,$$

а его собств. значения непосредственно выражаются через собств. значения  $\hat{F}$ :

$$\mathcal{F}(\hat{F})\psi_n = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left( \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \xi} \right)_{\xi=0} f_n^k \psi_n = \mathcal{F}(f_n)\psi_n.$$

Если два  $O$  в  $\hat{F}$  и  $\hat{G}$  имеют одну и ту же систему собств. ф-ций,  $\hat{F}\psi_n = f_n\psi_n$  и  $\hat{G}\psi_n = g_n\psi_n$ , то порядок действия этих  $O$  в произведении безразличен и коммутатор этих  $O$  равен нулю:  $[\hat{F}\hat{G}] = \hat{F}\hat{G} - \hat{G}\hat{F} = 0$ .

И наоборот, величины  $F$  и  $G$  могут одновременно иметь определённые значения только в том случае, если коммутатор  $O$  в  $\hat{F}$  и  $\hat{G}$  равен нулю. В противном случае физ. величины  $F$  и  $G$  не могут (в рамках квантовой теории) одновременно иметь точные значения. Некоммутиативность ряда  $O$  физ. величины приводит к существованию соответствующих *неопределённости соотношений* в квантовой механике. Т. к. при эрмитовом сопряжении произведения двух  $O$  порядок их расположения меняется,  $(\hat{F}\hat{G})^\dagger = \hat{G}^\dagger\hat{F}^\dagger$ , то произведение эрмитовых  $O$  будет также эрмитовым  $O$  только в случае, если эти  $O$  коммутируют друг с другом.

Поставая задачи на полное определение ф-ции состояния и полного набора квантовых чисел  $n$ , характеризующих это состояние, для систем с  $\lambda$  степенями свободы (с обязат. исключением степеней свободы, связанной с возможными энергич. состояниями) заключается в построении полного набора независимых коммутирующих друг с другом  $O$   $\hat{F}_1, \dots, \hat{F}_\lambda$ , характеризующих положение системы по отношению к её степеням свободы, и совместном решении ур-ний

$$\hat{F}_i\psi_{n_1, \dots, n_\lambda}(x) = f_i(n_1, \dots, n_\lambda)\psi_{n_1, \dots, n_\lambda}(x), \quad i = 1, \dots, \lambda,$$

со всеми необходимыми для волновой ф-ции  $\psi$  дополнит. условиями, соответствующими характеру рассматриваемой задачи.

Конкретное матем. выражение  $O$  динамич. величины зависит от выбора пространства  $x$ , на к-ром определены ф-ция состояния  $\psi(x)$ .

$O$  в конфигурационном (координатном) представлении. Если волновая ф-ция системы задана как ф-ция пространства, координат и времени,  $\psi = \psi(r,t)$ , то простейшими  $O$ , с помощью к-рых строятся все остальные  $O$  динамич. величин, являются  $O$  координаты  $\hat{r} = (x, y, z)$ , определяемый как умножение на координаты  $\psi(r,t) = r\psi(r,t)$ , и  $O$  импульса  $\hat{p} = (\hat{p}_x, \hat{p}_y, \hat{p}_z)$ , являющийся дифференц.  $O$  первого порядка:

$$\hat{p}\psi(r, t) = -i\hbar\nabla\psi(r, t).$$

Собств. ф-ция  $O$  координаты, соответствующая собств. значению  $r_0$ , представляет собой *дельта-функцию* Дирака:  $\psi_{r_0}(r) = \delta(r - r_0)$ , а собств. ф-ция  $O$  импульса, соответствующая собств. значению  $p$ , — плоскую волну

$$\psi_p(r) = (2\pi\hbar)^{-3/2} \exp\{i(p\mathbf{r}/\hbar)\}$$

в обоих случаях нормировка  $\psi_{r_0}(r)$  и  $\psi_p(r)$  производится на  $\delta$ -функцию.  $O$  любой динамич. величины  $F(p, r)$  определяется как

$$\hat{F}(p, r) = F(\hat{p}, \hat{r}) = F(-i\hbar\nabla, r).$$

Т. к.  $\hat{r}$  и  $\hat{p}$  не имеют общей системы собств. ф-ций, то  $O$  динамич. величин, как правило, не коммутируют друг с другом, в частности

$$[F(\hat{p}), \hat{r}_\alpha] = -i\hbar \frac{\partial F}{\partial p_\alpha}; \quad [\hat{p}_\alpha, G(\hat{r})] = -i\hbar \frac{\partial G}{\partial r_\alpha}, \quad \alpha = x, y, z, \quad 411$$



$$[\hat{P}(\hat{p}), \hat{p}_\alpha] = [\hat{G}(\hat{r}), \hat{r}_\alpha] = 0.$$

Для системы из  $N$  частиц динамика, переменные представляются совокупностью координат  $r_1, \dots, r_N$  и импульсов  $p_1, \dots, p_N$  и в написанных выше ф-лах аргументы  $r$  и  $p$  заменяются на  $r_1, \dots, r_N$  и  $p_1, \dots, p_N$ , где каждое  $\hat{r}_i$  является дифференц. О., действующим на аргумент  $r_i$  ф-ции  $\psi(r_1, \dots, r_N)$ .

В качестве примеров для О.  $\hat{F}(p, r)$  может служить оператор Гамильтона (*самилтониан*)  $\hat{H}$ , играющий принципиальную роль во всей квантовой теории и определяющий данную конкретную систему, и О. орбитального (углового) момента  $\hat{M}$ . Для  $N$  взаимодействующих между собой нерелятивистских частиц гамильтониан имеет вид

$$\hat{H} = \sum_{1 \leq i \leq N} \left\{ \frac{\hat{p}_i^2}{2m_i} + U(r_i) \right\} + \sum_{1 \leq i < j \leq N} \Phi(r_i, r_j),$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -й частицы,  $U(r_i)$  и  $\Phi(r_i, r_j)$  — потенциалы взаимодействия частиц с внеш. полем и друг с другом (если это взаимодействие не зависит от скорости частиц). Для системы зарядк. частиц О. импульса заменяется:

$$\hat{p}_i \rightarrow \hat{p}_i - (e_i/c)A(r_i, t),$$

где  $A(r, t)$  — векторный потенциал эл.-магн. поля,  $e_i$  — заряд частицы (в гауссовой системе единиц).

О. момента  $\hat{M}$  представляет собой сумму О. моментов для каждой из  $N$  частиц. Для одной частицы  $\hat{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = (r_i p_j - r_j p_i) \nabla$ . Компоненты О. моменты не коммутируют друг с другом,  $[\hat{M}_x, \hat{M}_y] = i\hat{M}_z$  (две др. пары соотношений получаются при циклич. замене  $x \rightarrow y \rightarrow z \rightarrow x$ ), но  $[\hat{M}_x^2, \hat{M}_x] = 0$ , поэтому в квантовой теории имеет смысл говорить о состояниях с определёнными значениями квадрата момента и одной из его компонент, обычно  $\hat{M}_z$ . Эти О. как коммутирующие друг с другом имеют общую систему собств. ф-ций [сферические функции  $Y_l^m(\theta, \varphi)$ , где  $\theta$  и  $\varphi$  — угл. переменные сферич. координат] и характеризуются собств. значениями  $M^2 = \hbar^2 l(l+1)$  и  $M_z = \hbar m$ , где  $l = 0, 1, 2, \dots$  и  $m = -l, -l+1, \dots, l$  — соответствующие орбит. и магн. квантовые числа. Если частица движется в центрально-симметричном поле  $U(r) = U(|r|)$ , то  $\hat{H}$ ,  $\hat{M}^2$  и  $\hat{M}_z$  образуют полный набор коммутирующих О. для данной системы с общей системой собств. ф-ций  $R_{nl}(r)Y_l^m(\theta, \varphi)$ , причём  $l$  определяет не только величину  $M^2$  (и паряду с гл. квантовым числом  $l$  энергетич. состояние системы), но и пространственную чётность состояния, характеризующую изменение волновой ф-ции при инверсии координат,  $\hat{P}\psi(r) = \psi(-r) = (-1)^l \psi(r)$  ( $\hat{P}$  — О. инверсии), т. е. чётность состояния совпадает с чётностью  $l$ .

**Импульсное представление.** Если разложить  $\psi(r)$  по собств. ф-циям  $\psi_p(r)$  О. импульса:

$$\psi(r) = \int \Phi(p) \psi_p(r) dp, \quad \Phi(p) = \int \psi(r) \psi_p^*(r) dr,$$

то волновой ф-цией системы в импульсном представлении (в  $k$ -ром квадрат её модуля определяет распределение плотности вероятности распределения по  $p$ ) будет её фурье-образ  $\Phi(p)$ . В соответствии с этим преобразованием О. координаты становится дифференциальным, а О. импульса — О. умножения:

$$\hat{r} \Phi(p) = i\hbar \frac{\partial}{\partial p} \Phi(p); \quad \hat{p}_0 \Phi(p) = p_0 \Phi(p).$$

Нормированные на  $\delta$ -функцию собств. ф-ции этих О. имеют вид

$$\Phi_r(p) = \left( \frac{1}{2\pi\hbar} \right)^{3/2} \exp(-ipr/\hbar); \quad \Phi_p(p) = \delta(p - p_0).$$

О. динамика, соответствующие  $\hat{F}(p, r)$  определяются как

$$\hat{F}(p, r) = F(\hat{p}, \hat{r}) = F\left(p, i\hbar \frac{\partial}{\partial p}\right).$$

**Матричное представление.** Рассмотренные выше представления являются частными случаями, когда в качестве системы базисных ф-ций  $\{\psi_n(x)\}$  выбирались собств. ф-ции координаты или импульса. В общем случае волновая ф-ция системы  $\psi(x, t)$  может быть задана совокупностью компонент  $\Phi(t) = \{\Phi_n(t)\}$  в пространстве с достаточно произвольно выбранным базисом  $\{\psi_n(t)\}$ ,

$$\Phi_n(t) = \int \psi(x, t) \psi_n^*(x) dx,$$

причём величины  $|\Phi_n(t)|^2$  определяют вероятности обнаружить систему в каждом из состояний  $\psi_n(x)$ . Представляя  $\psi(x, t)$  в виде столбца из её компонент  $\{\Phi_n(t)\}$  [сопряжённую ей — в виде строки из элементов  $\Phi_n(t)$ ], а  $\hat{F}$  в виде квадратной матрицы

$$\langle n | F | m \rangle = \int \psi_n^*(x) \hat{F} \psi_m(x) dx,$$

можно записать результат действия этого О.  $\hat{F}\Phi = f\Phi'$  в виде алгебры. соотношений, определяющих изменения в результате поворота вектора  $\Phi(t)$  запятой компонент  $\Phi'_i(t)$  через их исходные значения:

$$f \Phi'_i = \sum_k \langle n | F | m \rangle \Phi_m, \quad \sum_j |\Phi'_j|^2 = 1.$$

Матричные представления могут быть дискретными, непрерывными (как в случаях координатного и импульсного представления) и смешанного типа, когда часть квантовых чисел, входящих в  $n$ , дискретна, часть непрерывна. Приведём нек. общих соотношений в матричном выражении. Алгебра действия над О.:

$$\langle n | F_1 \cdot F_2 | m \rangle = \sum_k \langle n | F_1 | k \rangle \langle k | F_2 | m \rangle,$$

$$\langle n | F_1 + F_2 | m \rangle = \langle n | F_1 | m \rangle + \langle n | F_2 | m \rangle;$$

условие самосопряжённости  $\hat{F}$ :

$$\langle n | F^+ | m \rangle = \langle n | (F^T)^* | m \rangle = \langle m | F | n \rangle^*;$$

единичный О.  $\langle n | I | m \rangle = \Delta(n - m)$  [в случае дискретного спектра  $\Delta(n - m) = \delta_{nm}$ , где  $\delta_{nm}$  — *Кronecker символ*, в случае непрерывного спектра  $\Delta(n - m) = \delta(n - m)$ , где  $\delta(n - m)$  — дираковская  $\delta$ -функция]; ф-ла для ср. значений:

$$\bar{F} = \sum_{nm} \Phi_n^* \langle n | F | m \rangle \Phi_m.$$

Проблема расчёта собств. значений и собств. ф-ций сводится к решению системы однородных относительно компонент  $\Phi_n$  ур-ний

$$\sum_m \langle n | F | m \rangle \Phi_m = f \Phi_n,$$

причём условие существования нетривиального решения для  $\{\Phi_n\}$

$$\det \|\langle n | F | m \rangle - f \Delta(n - m)\| = 0$$

является ур-нием (степени, равной рангу матриц, фигурирующих в данном представлении), определяющим спектр собств. значений  $\{f_n\}$ .

Если в качестве базиса  $\{\psi_n(x)\}$  выбрана система собств. ф-ний О.  $\hat{F}$ , то его матричное представление диагонально,  $\langle n | F | m \rangle = f_n \Delta(n - m)$ , поэтому проб-

лему определения собств. ф-ций и собств. значений нек-рого  $O$ , или неск. коммутирующих друг с другом  $O$ , можно представить как проблему одноврем. диагонализации их матричных представлений.

Если в качестве базисных ф-ций  $\{\psi_n(x)\}$  используются собств. ф-ции оператора Гамильтона,  $\hat{H}\psi_n = \epsilon_n\psi_n$ , то говорят об энергетич. представлении  $O$  и ф-ций состояния. Однако собств. ф-ции  $O$ ,  $\hat{H}$ , как правило, неизвестны. Поэтому в ряде случаев в качестве системы базисных ф-ций  $\{\psi_n^{(a)}(x)\}$  выбирают собств. ф-ции той части  $\hat{H}_0$  полного гамильтониана  $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_1$ , для к-рой удастся получить точное решение для собств. ф-ций и собств. значений,  $\hat{H}_0\psi_n^{(a)}(x) = \epsilon_n^{(a)}\psi_n^{(a)}(x)$ , и затем уже в этом матричном представлении развивают теорию возмущений по параметру, к-рому пропорц. часть  $\hat{H}_1$ , как для расчёта собств. значений  $\epsilon_n$  полного  $\hat{H}$ , так и его собств. ф-ций.

Матричное представление является ограниченным для  $O$ . момента ввиду дискретности квантовых чисел  $l$  и  $m$ . Т. к. каждому  $l$  соответствует  $2l + 1$  значений числа  $m$ , то собств. ф-ции  $O$ ,  $\hat{M}_z^2$  и  $\hat{M}_z$  представляются столбцами, а  $O$ , моменты — матрицами ( $2l + 1$ )-ранга, ненулевые элементы к-рых определяются ф-лами

$$\langle l, m | \hat{M}_z^2 | l, m \rangle = \hbar^2 l(l+1), \quad \langle l, m | \hat{M}_z | l, m \rangle = \hbar m,$$

$$\langle l, m | \hat{M}_x + i\hat{M}_y | l, m-1 \rangle = \langle l, m-1 | \hat{M}_x - i\hat{M}_y | l, m \rangle = \hbar \sqrt{l(l-m+1)(l+m)}.$$

Эти же соотношения справедливы и для  $O$ . полного момента  $\hat{J} = \hat{M} + \hat{S}$ , включающего помимо  $O$ . орбит. момента  $\hat{M}$  также и  $O$ . спина  $\hat{S}$  (для  $k$ -рого нематричного представления просто не существует), причём квантовое число  $j$ , замещающее в этом случае  $l$  в приведённых выше ф-лах, принимает ряд целых или полуцелых значений, а число  $m = -j, -j+1, \dots, j$  пробегает  $2j + 1$  значений.

Общие ф-лы для  $O$ . момента определяют также и  $O$ . спинового момента частицы  $\hat{S}$ . Так, для частиц со спином  $1/2$   $O$ . спина  $\hat{S} = (\hbar/2)\sigma$ , где  $\sigma$  — двухрядные Паули матрицы. Поэтому и состояние электрона (в нерелятивистской теории) будет описываться соответственно двухкомпонентной волновой ф-цией (причём помимо классич. замены в гамильтониане этой системы  $p \rightarrow p - (e/c)\mathcal{A}$  он должен быть дополнен энергетич. взаимодействием —  $\mu\mathcal{H}$  собств. магн. момента электрона  $\mu = (eh/2mc)\sigma$  с внеш. магн. полем  $\mathcal{H}(r,t)$ ). В релятивистской теории электрона состояние частицы описывается четырёхкомпонентной волновой ф-цией (не исключено матричное представление для каждой из них) в соответствии с разл. синоними состояниями электрона и состояниями частица и античастица, а  $O$ . выражается четырёхрядными матрицами, элементы к-рых сами могут быть  $O$ . в к.-л.  $z$ -представлении. Простейшие примеры полных наборов коммутирующих  $O$ . для случая свободного движения электрона: гамильтониан  $\hat{H}_D = c(\hat{p}\alpha + m^0\beta)$ , импульсе, проекции спина на направление импульса  $(\hat{S}\hat{p})$ , где  $\hat{S} = (\hbar/2)\sigma$ , а  $\alpha = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ ,  $\beta$  — четырёхрядные Дирака матрицы; или  $O$ .  $\hat{H}_D$ ,  $\hat{F}_z$ ,  $\hat{J}_z$  и  $O$ . инверсии  $\hat{I}\beta$ . Собств. ф-ции при нервом выборе характеризуются плоскими волнами (с импульсом  $p$ ), проекцией спина  $s = \pm 1/2$  и энергией  $\epsilon = \pm c\sqrt{p^2 + m^0c^2}$ , при втором — сферич. волнами, числами  $j, m$  и  $l$  (чётности). При движении электрона в центрально-симметричном поле  $U(r)$  системой коммутирующих  $O$ . полностью определяющих состояние системы, являются гамильтониан  $\hat{H} = \hat{H}_D + U(r)$ ,  $O$ . квадрата полного момента  $\hat{J}^2$ , его проекции  $\hat{J}_z$  и чётности  $\hat{I}\beta$ . Для частиц со спином 1

необходимо использовать уже как минимум трёхрядные матрицы и т. д.

Представление вторичного квантования эффективно при рассмотрении систем, состоящих из большого числа одинаковых частиц (проблема мн. тел в статистич. механике; см. *Квантовая теория многих частиц*), или системе, допускающих существование любого числа частиц одного и того же сорта (см. *Квантовая теория поля*), и является одним из наиб. естеств. способов учёта свойств симметрии волновых ф-ций системы по отношению к перестановкам одинаковых частиц. В основе своей — это матричное представление, для формулировки  $k$ -рого используются  $N$ -частичные базисные ф-ции с определённым типом симметрии  $\Psi_k(x)$ , сконструированные как симметризов. или антисимметризов. произведения одночастичных ф-ций  $\varphi_j(x_i)$  (чаще всего для этого используются известные решения задач на свободное движение частицы данного типа), где  $x = x_1, \dots, x_N$ , а в наборе квантовых чисел  $n = (n_1, n_2, \dots, n_j, \dots, n_N)$  из  $n_j$  указывает, сколько раз в структуре данной базисной ф-ции встречается ф-ция  $\varphi_j(x_i)$  с данным индексом  $j$ . Числа  $n_j$  наз. *числами заполнения* (отсюда и  $\sum_j n_j = N$ ), а базисные ф-ции обычно обозначают символами  $\Psi_n(x) = |\dots, n_j, \dots\rangle$ , введёнными П. А. М. Дираком (P. A. M. Dirac), при этом  $\Psi^*(x) = \langle \dots, n_j, \dots |$ . Отличие систем, симметричных и антисимметричных по отношению к перестановкам двух частиц, проявляется в том, что в первом случае (бозе-частицы)  $n_j$  могут принимать любые целые неотрицат. значения, а во втором (ферми-частицы) — только 0 и 1.

Это ограничение на числа заполнения для ферми-систем выражает Паули принцип.  $O$ . динамич. величина, представленные соответствующими матрицами  $\langle \dots, n_j, \dots | [f] | \dots, n_j, \dots \rangle$ , действуя на волновую ф-цию, имеющую в этом представлении вид вектора с компонентами  $\Phi(\dots, n_j, \dots)$ , характеризуются определёнными наборами чисел  $n_j$ , «перепутывают» эти наборы. Иными словами, вместо нек-рого  $\Phi(\dots, n_j, \dots)$  в результате действия  $O$ .  $F$  получается амплитуда  $\Phi(\dots, n_j', \dots)$ , к-рая характеризует уже другие, изменённые числами заполнения те же состояния  $f_j$ , т. е.  $O$ . в этом представлении меняет числа частиц в каждом из состояний  $f$ . Удобно рассматривать «элементарные»  $O$ . изменяющие на единицу к.-л. из числа заполнения  $n_j$ , т. е.  $O$ . рождения и  $O$ . уничтожения и  $z$ -частицы в состоянии  $f$ , и с их помощью выражать более сложные  $O$ .  $F$ . Действие каждого такого  $O$ . рождения и уничтожения меняет на единицу не только определённое число  $n_j$ , но и общее число частиц  $N$ . Т. о., для использования формализма вторичного квантования необходимо оперировать с бесконечным набором пространств и соответствующих им базисных систем ф-ций  $|\dots, n_j, \dots\rangle$  для всех значений общего числа  $N$  от нуля до бесконечности. Конкретный результат действия элементарных  $O$ . на эти базисные ф-ции определяется с помощью непосредств. расчёта соответствующих матричных элементов. Действие их на  $|\dots, n_j, \dots\rangle$  в случае бозе-систем можно представить в виде

$$a_f | \dots, n_j, \dots \rangle = \sqrt{n_j} | \dots, n_j - 1, \dots \rangle$$

для  $O$ . уничтожения  $a_f$  и

$$a_f^+ | \dots, n_j, \dots \rangle = \sqrt{n_j + 1} | \dots, n_j + 1, \dots \rangle$$

для  $O$ . рождения  $a_f^+$ , причём ни  $a_f$ , ни  $a_f^+$  не действуют на числа  $n_{j'}$ , если  $j' \neq j$ . Отсюда следуют перестановочные соотношения

$$[a_f, a_{f'}^+] = \Delta(f - f');$$

$$[a_f, a_{f'}] = [a_f^+, a_{f'}^+] = 0.$$

В случае ферми-систем  $a_j$  и  $a_j^+$  имеют тот же смысл О. изменения на единицу числа  $n_j$ , но учёт антисимметрии базисных ф-ций по отношению к перестановкам индексов частиц и ограничение чисел заполнения двумя значениями 0, 1 приводит к перестановочным соотношениям антикоммутиации:

$$[a_j, a_j^+]_{\pm} = a_j a_j^+ + a_j^+ a_j = \Delta(f - f');$$

$$[a_j, a_{j'}]_{\pm} = [a_j^+, a_{j'}^+]_{\pm} = 0.$$

В ряде задач, когда гамильтониан системы целиком выражается в терминах спиновых О., удобно О. рождения и уничтожения с коммутат. соотношениями смешанного типа:

$$[a_j, a_j^+]_{\pm} = 1, \text{ по } [a_j, a_{j'}^+]_{\pm} = 0 \text{ для } j' \neq j,$$

$$[a_j, a_{j'}]_{\pm} = [a_j^+, a_{j'}^+]_{\pm} = 0.$$

По своей матем. природе они тождественны бозе-О., но действуют в узранном пространстве чисел заполнения, допускающих значения  $n_j = 0$  и  $n_j = 1$ . Их называют  $\alpha$  и  $\beta$  О., т. к. они непосредственно связаны со спиновыми матрицами Паули:

$$\sigma_j^x = a_j^+ + a_j; \sigma_j^y = i(a_j^+ - a_j); \sigma_j^z = 1 - 2a_j^+ a_j.$$

Во всех случаях О.  $n_j = a_j^+ a_j$  является О. числа частиц в состоянии  $j$  и имеет всевозм. значения  $n_j = 0, 1, 2, \dots$  для бозе-систем и  $n_j = 0, 1$  для ферми- и паули-систем.

Чаще всего в приложениях индекс  $j$  означает импульс и спин  $f = (p, \sigma)$  частицы, т. е. в качестве базисных ф-ций  $|\dots, n_j, \dots\rangle$  выбираются симметризов. или антисимметризов. произведения ф-ций  $\psi(x) = u_{\sigma}(s)\varphi_{\mathbf{k}}(r)$ , где  $\varphi_{\mathbf{k}}(r) = (1/\sqrt{V}) \exp(i\mathbf{k}r)$  — плоская волна ( $V$  — объём системы),  $u_{\sigma}(s) = \Delta(\sigma - s)$  — спиновая ф-ция. Тогда  $a_j^+$  и  $a_j -$  О. рождения и уничтожения частицы с данным значением импульса и спина. Возможно и «координатное» (или к.-л. иное) представление этих О., определяемое с помощью преобразования типа фурье-преобразования:

$$[x = (r, s)], \Psi(x) = \sum_j a_j \varphi_j(x), \Psi^+(x) = \sum_j a_j^+ \varphi_j^*(x).$$

О. динамич. величин в представлении вторичного квантования строятся след. образом: величинами аддитивного динамич. типа, таким, что  $F = \sum_{1 \leq i \leq N} F(x_i)$  (напр., полный импульс системы из  $N$  частиц, их полная кинетич. энергия, энергия взаимодействия с внеш. полем и т. д.) соответствуют О.

$$\hat{F} = \int \Psi^+(x) \hat{F}(x) \Psi(x) dx = \sum_{f, f'} \langle f | F | f' \rangle a_f^+ a_{f'}$$

где  $\langle f | F | f' \rangle -$  О.  $\hat{F}$  в  $f$ -представлении, матричные элементы  $k$ -рого рассчитываются с помощью ф-ций  $\psi(x)$ ; величинам бинарного типа  $G = \sum_{1 \leq i \leq N} G(x_i, x_j)$  (напр., энергии взаимодействия частиц друг с другом) соответствуют О.

$$\hat{G} = \frac{1}{2} \int \Psi^+(x_1) \Psi^+(x_2) \hat{G}(x_1, x_2) \Psi(x_1) \Psi(x_2) dx_1 dx_2 =$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{f_1, f_2, f_1', f_2'} \langle f_1, f_2 | G | f_1', f_2' \rangle a_{f_1}^+ a_{f_2}^+ a_{f_1'} a_{f_2'}$$

где  $\langle f_1, f_2 | G | f_1', f_2' \rangle -$  матричный элемент О.  $\hat{G}$  в  $f$ -пред-

ставлении, рассчитанный с помощью системы ф-ций  $\psi(x_i)$ , и т. д.

Напр., гамильтониан системы нерелятивистских частиц с центр. их взаимодействием  $\Phi(r_1, r_2) = \Phi(r_1 - r_2)$ , находящихся во внеш. поле  $U(r)$ , в представлении вторичного квантования имеет вид

$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{k}} \frac{\hbar^2 k^2}{2m} a_{\mathbf{k}}^+ a_{\mathbf{k}} + \frac{1}{2V} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} u^*(x) a_{\mathbf{k}+\mathbf{x}}^+ a_{\mathbf{k}} +$$

$$+ \frac{1}{2V} \sum_{\mathbf{x}, \mathbf{k}, \mathbf{k}'} v(x) a_{\mathbf{k}+\mathbf{x}}^+ a_{\mathbf{k}'-\mathbf{x}} a_{\mathbf{k}} a_{\mathbf{k}'},$$

где  $v(x)$  и  $u(x)$  — фурье-образы потенциалов  $\Phi$  и  $U$ , причём для частиц со спином нижний индекс у  $a^+$  и  $a$  помимо волнового вектора  $\mathbf{k}$  включает и спиновый индекс  $s$ :  $k = (\mathbf{k}, s)$ ,  $k + \mathbf{x} = (\mathbf{k} + \mathbf{x}, s)$  и т. д. Каждое слагаемое этого О. имеет наглядный смысл: общая кинетич. энергия представлена как сумма по всем  $\mathbf{k}$  кинетич. энергий  $\hbar^2 k^2 / 2m$ , умноженных на числа частиц  $a_{\mathbf{k}}^+ a_{\mathbf{k}} = n_{\mathbf{k}}$  с этой энергией, каждое слагаемое из второй суммы учитывает рассеяние частицы  $\mathbf{k} \rightarrow \mathbf{k} + \mathbf{x}$  на фурье-компоненте внеш. поля  $u(x)$ , а из третьей суммы — рассеяние двух частиц  $(\mathbf{k}, \mathbf{k}') \rightarrow (\mathbf{k} + \mathbf{x}, \mathbf{k}' - \mathbf{x})$  на фурье-компоненте потенциала их взаимодействия  $v(x)$ .

Помимо модели иррентного взаимодействия частиц, возможной только в релятивистской теории, рассмотрим взаимодействие частиц с разл. полями, переносщими это взаимодействие: в электродинамике с эл. магн. полем (полем фотонов), в статич. физике — с полем фононов и т. д. В гамильтониан системы в этом случае необходимо добавит свободную энергию этого поля  $\sum_{\mathbf{k}} \omega(\mathbf{k}) b^+ b_{\mathbf{k}}$  и О. взаимодействия его с частицами системы, имеющий вид

$$\frac{1}{\sqrt{V}} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{x}} f(x) (a_{\mathbf{k}+\mathbf{x}}^+ a_{\mathbf{k}} b_{\mathbf{x}} + a_{\mathbf{k}-\mathbf{x}}^+ a_{\mathbf{k}} b_{\mathbf{x}}^+),$$

причём элементарный акт этого взаимодействия имеет характер рассеяния частицы с испусканием (или поглощением) кванта поля  $b$ . Подобные наглядные представления о взаимодействии послужили одним из стимулов развития диаграммной техники в квантовой теории поля и в квантовой статистике.

О. энергии и производные О. по времени. В квантовой теории О. энергии определяется как первая производная по времени,  $\hat{\mathcal{E}} = \hbar \partial / \partial t$ . С его помощью записываются ур-ние Шрёдингера — осн. ур-ние квантовой механики, являющиеся ур-нием движения для волновой ф-ции,  $(\hat{\mathcal{E}} - \hat{H})\psi(t) = 0$ . После подстановки  $\psi(t) = \exp(-i\hat{\mathcal{E}}t/\hbar)\psi$  оно превращается в ур-ние на состав. значения гамильтониана,  $(\hat{\mathcal{E}} - \hat{H})\psi = 0$ , и определяет стационарные состояния системы. О. производной по времени  $\hat{F}$  ф-ции величини  $F$  определяется в соответствии с ур-нием движения для  $\psi$  как

$$\hat{F} \equiv \frac{\partial \hat{F}}{\partial t} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial t} + [i\hbar, \hat{F}]_{-},$$

что позволяет определять в квантовой механике О. величин типа скоростей, ускорений и т. д. Если величина  $F$  не зависит явно от времени и коммутатор  $[i\hbar, \hat{F}] = 0$ , то эта величина является интегралом движения.

В релятивистской теории помимо ур-ний, содержащих О.  $\hat{\mathcal{E}}$  в нервной степени, напр. Дирака уравнение  $(\hat{\mathcal{E}} - H_D)\psi = 0$ , используются ур-ния второго порядка по  $\hat{\mathcal{E}}$  (Клейна—Гордона уравнение),  $[\hat{\mathcal{E}}^2 - (c\hat{p}^2 + mc^2)]\psi = 0$ , для однокомпонентной  $\psi$ -функции частицы без спина, а также для векторных 4-компонентных ф-ций и тензорных более высокого ранга. Оператор  $\hat{\mathcal{E}}$  можно рассматривать как нулевою компоненту релятивистского О. энергии-импульса  $\hat{P}_{\mu} = (\hat{\mathcal{E}}, c\hat{p})$ ,  $\mu = 0, 1, 2, 3$ , что по-

зволет использовать для релятивистских ур-ний удобную лоренц-ковариантную запись.

**Различные временные представления О.** Рассмотренная выше схема квантовой теории, когда не зависящей от времени динамич. величине  $F$  ставится в соответствие также не зависящий от  $t$  О,  $F$ , а эволюция системы целиком определяется увеличением волновой ф-ции, подчиняющейся ур-нию Шрёдингера, формальное решение к-рого можно представить как

$$\psi(t) = \exp\left\{-\frac{i}{\hbar}\hat{H}(t-t_0)\right\}\psi(t_0),$$

наз. *Шрёдингера представлением* для О. и ф-ций состояния. Из возможных др. временных представлений отменим два, широко используемых в квантовой теории. В *Гейзенберга представлении*  $\psi$ -функция является пост. вектором; полагая в приведенной выше ф-це  $t_0 = 0$ , можно представить эту ф-цию как пач. значение рассмотренной ранее  $\psi^{(H)} = \psi(0)$ , а зависимость от  $t$  перейдется на О. динамич. величин:

$$\hat{F}^{(H)}(t) = \exp\left\{\frac{i}{\hbar}\hat{H}t\right\}\hat{F}\exp\left\{-\frac{i}{\hbar}\hat{H}t\right\},$$

ур-ние движения для к-рых имеет вид

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\hat{F}^{(H)}(t) = [\hat{H}, \hat{F}^{(H)}(t)].$$

Для построения *взаимодействующего представления* существование разделение  $\hat{H}$  на части,  $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}'$ , связанное обычно с применением теории возмущений. В этом временном представлении зависимость  $\hat{F}$  от  $t$  определяется с помощью нулевого гамильтониана:

$$\hat{F}^{(I)}(t) = \exp\left\{\frac{i}{\hbar}\hat{H}_0 t\right\}\hat{F}\exp\left\{-\frac{i}{\hbar}\hat{H}_0 t\right\},$$

а эволюция волновой ф-ции

$$\psi^{(I)}(t) = \exp\left\{i(\hat{H}_0/\hbar)t\right\}\psi(t)$$

определяется О.  $\hat{H}'^{(I)}$ :

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi^{(I)}(t) = \hat{H}'^{(I)}(t)\psi^{(I)}(t),$$

причём формальное решение этого ур-ния можно записать как

$$\psi^{(I)}(t) = S(t, t_0)\psi^{(I)}(t_0),$$

где оператор  $S$ -матрицы (наз. *матрицей рассеяния*)

$$S(t, t_0) = \exp\left\{\frac{i}{\hbar}\hat{H}_0 t\right\}\exp\left\{-\frac{i}{\hbar}\hat{H}(t-t_0)\right\}\exp\left\{-\frac{i}{\hbar}\hat{H}_0 t_0\right\}.$$

**Матрица плотности, матрица рассеяния и другие О.** Наряду с О., непосредственно связанными с определенными физ. переменными, в квантовой теории используются О., к-рые определяют все свойства системы, включая её состояние, или ряд её свойств. Выше предполагалось, что состояние квантовомехан. системы фиксируется с помощью волновой ф-ции, представляемой вектором  $\Phi(t) = \{\Phi_n(t)\}$ . Если этому т. в. *чистой состоянию* поставить в соответствие О.  $\rho(t)$  с матричными элементами  $\langle n|\rho|m\rangle = \Phi_n^*(t)\Phi_m(t)$ , то ср. значения физ. величин  $F$  запишутся как

$$\bar{F} = \sum_{n,m} \langle n|\rho|m\rangle \langle m|F|n\rangle = \text{Sp}\{\rho\hat{F}\},$$

а сам О.  $\rho(t)$  в соответствии с ур-нием Шрёдингера для  $\Phi(t)$  будет удовлетворять ур-нию

$$i\hbar\frac{\partial \rho(t)}{\partial t} = \hat{H}\rho - \rho\hat{H}$$

и иметь формальное решение в виде

$$\rho(t) = \exp\left\{-\frac{i}{\hbar}\hat{H}t\right\}\rho(0)\exp\left\{\frac{i}{\hbar}\hat{H}t\right\}.$$

О.  $\rho$  наз. *матрицей плотности*. Он характеризует систему и в случаях, когда она находится в т. н. *смешанном состоянии*, что существенно, напр., при рассмотрении статист. систем. Матричное представление О.  $\rho$  может быть определено в смешанном представлении (напр., в координато-импульсном), что невозможно в традиц. квантовой механике, оперирующей с чистыми квантовомехан. состояниями. О.  $\rho(t)$  доускает помимо шрёдингеровского и иные временные представления.

О.  $S$ -матрицы (и его модификаций, включая температурные варианты) определяет изменение свойств системы по отношению к нек-рому известному «исходному» состоянию, напр. к состоянию с «выключенным» взаимодействием частиц  $\hat{H}_1$  (для этого в  $\hat{H}$  добавляют фактор  $\exp\{-\varepsilon|t|\}$ ,  $\varepsilon > 0$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$ , обеспечивающий выключение взаимодействия при  $t \rightarrow \pm\infty$ ). Тогда для конечного  $t$  ( $t_0 \rightarrow -\infty$ ) введённый ранее О. можно представить как бесконечный ряд, записываемый условно в виде т. н.  $T$ -экспоненты, т. е. упорядоченного по временным аргументам (см. *Хронологическое произведение*) степенного её разложения:

$$S(t) = T \exp\left\{-\frac{i}{\hbar} \int_{-\infty}^t \hat{H}_1(\tau) d\tau\right\} = \\ = \sum_{n=0}^{\infty} \left(-\frac{i}{\hbar}\right)^n \int_{-\infty}^t d\tau_1 \int_{-\infty}^{\tau_1} d\tau_2 \dots \int_{-\infty}^{\tau_{n-1}} d\tau_n \hat{H}_1^{(I)}(\tau_1) \dots \hat{H}_1^{(I)}(\tau_n).$$

Этот ряд служит основой для построения приближений в рамках теории возмущений по  $\hat{H}_1$ .

О.  $T$ -матрицы, родственной О.  $S$ , на простейшем примере задачи двух тел (задачи рассеяния) модифицирует падающую на бесконечности на рассеивающий центр  $\hat{H}_1 = \Phi(r)$  плоскую волну  $\psi_0(r)$  в расходящуюся волну  $\psi_k$  (в соответствии с граничными условиями квантовомехан. задачи рассеяния), так что  $\hat{H}_1\psi_0^* = \text{тр}$ . Ур-ние Шрёдингера, записанное в терминах  $t$ -О., в его формальное решение имеют вид

$$t = \hat{H}_1 + \hat{H}_1 \frac{1}{\rho - \hat{H}_0 + i\varepsilon} t; \quad t = \hat{H}_1 + \hat{H}_1 \frac{1}{\rho - (\hat{H}_0 + \hat{H}_1) + i\varepsilon} \hat{H}_1.$$

В случаях, когда потенциал  $\Phi(r)$  не имеет фурье-образа (напр., при взаимодействии твёрдых сфер конечного радиуса), а использование импульсного варианта представления вторичного квантования всё же рационально, импульсное представление  $t$ -О. заменяет несуществующую величину  $\nu(q)$ , причём при малых передачах импульса  $|q|$  матричный элемент  $t$ -О. выходит на константу, пропорц. *длине рассеяния*  $a$ :

$$\nu(|q|) = \langle p + |q\rangle, p' - |q| | \Phi(r) | p, p' \rangle \rightarrow \\ \rightarrow -\langle p + |q\rangle, p' - |q| | t | p, p' \rangle \approx 2\pi a \delta^3/m.$$

**О. преобразований.** В квантовой теории такие О. широко используются для осуществления переходов к др. представлениям и координатам, для трансляций и поворотов в разд. пространствах, сдвига во времени, дискретных преобразований самого разного физ. содержания. Рассмотрим нек-рые из них.

Пусть  $\psi = \{\psi_n(x)\}$  — система базисных ф-ций, определяющих нек-рое  $\rho$ -представление О. и волновых ф-ций, а  $\psi' = \{\psi'_n(x)\}$  — др. базисная система, соответствующая  $\alpha$ -представлению. Переход от одной системы к другой

$$\psi'_n(x) = \sum_m \psi_m(x) \langle n|U|m\rangle,$$

где

$$\langle n|U|\alpha\rangle = \int \psi_n^*(x)\psi'_\alpha(x) dx,$$

можно символически записать с помощью линейного унитарного О.  $U$ , матричное представление к-рого при-

ведено выше, как  $\psi' = \psi U$ . Условие унитарности  $U^+ U = I$  является следствием ортонормированности базисных ф-ций  $\psi$  и  $\psi'$ . Т. к. обратный  $O. U^{-1} = U^+$ , то обратное преобразование имеет вид  $\psi = \psi' U^+$ . Обозначая символом  $F$  матричное представление  $O. \hat{F}$  в  $n$ -представлении  $\langle n | F | n' \rangle$  и символом  $\hat{F}'$  матрицу  $\langle \alpha | F' | \alpha' \rangle$ , будем иметь в компактной записи правило преобразования  $O.$  динамики, переменной от одного представления к другому в виде  $F' = U^+ F U$ . Преобразование ф-ции состояния, определяемое в  $n$ -представлении совокупностью компонент  $\Phi = \{\Phi_n\}$ , а в  $\alpha$ -представлении — совокупностью итрихованных компонент  $\Phi' = \{\Phi'_\alpha\}$ , записывается как  $\Phi' = U^+ \Phi$ .

Унитарные преобразования  $U$  сохраняют нормировку волновых ф-ций, свойство их ортогональности, порядок действия  $O.$  динамики, величину, сумму их диагональных элементов

$$\text{Sp} \hat{F}' = \sum_n \langle n | F | n \rangle = \sum_\alpha \langle \alpha | F | \alpha \rangle = \text{Sp} F'$$

в т. д. Проблему определения собств. значений  $O. F$  можно свести к проблеме построения такого  $O. U$ ,  $n$ -рый превращал бы матрицу  $\langle n | F | n' \rangle$  в диагональную:  $\langle \alpha | F' | \alpha' \rangle = f_\alpha \Delta(\alpha - \alpha')$ .

Примеры  $O.$  преобразований приводились выше. Так, переход к представлению Гейзенберга осуществлялся с помощью  $O. U = \exp(-iHt/\hbar)$ , к представлению взаимодействия — с помощью  $U = \exp(-iH_0 t/\hbar)$ , переход от координатного представления к импульсному (в одномерном случае) производится с помощью непрерывной матрицы  $\langle x | U | p \rangle = (1/\sqrt{2\pi\hbar}) \exp(ipx/\hbar)$  и т. д.

$O. U$  используются при преобразовании систем координат. При рассмотрении непрерывных преобразований (сдвиг, вращение) достаточно ограничиться бесконечно малым преобразованием данного типа. Напр.,  $O.$  бесконечно малого смещения координат непосредственно определяется первыми членами разложения ф-ции  $\psi$  в ряд Тейлора:

$$\psi(r + \delta r) = [1 + (i/\hbar) \delta r \hat{p}] \psi(r),$$

откуда для  $O.$  конечной трансляции  $U_{r_0} \psi(r) = \psi(r + r_0)$  получаем  $U_{r_0} = \exp(i r_0 \hat{p} / \hbar)$ . Аналогичная процедура с бесконечно малым смещением во времени приводит для конечного сдвига на  $\Delta t$  к известному результату:

$$\psi(t + \Delta t) = \exp(-i \hat{H} \Delta t / \hbar) \psi(t)$$

[в представлении взаимодействия]

$$\psi'(t + \Delta t) = S(t + \Delta t, t) \psi'(t),$$

где  $S(t_1, t_2) - S$ -матрица. При бесконечно малом повороте на угол  $\delta\varphi$  на скалярную ф-цию  $\psi(r)$  действует  $O. (1 + i\delta\varphi M/\hbar)$ , а для частицы со спином  $O. (1 + i\delta\varphi \hat{J}/\hbar)$ .  $O.$  конечного поворота, как видно из этих ф-л, представляются матрицами  $(2j + 1)$ -го ранга. В релятивистской теории при бесконечно малых поворотах в четырёхмерном пространстве на угол  $\delta\omega$  (при Лоренца преобразованиях)  $z'_\mu = \alpha_{\nu\mu} z_\nu = z_\nu + \delta\omega_{\nu\mu} z_\nu$ .  $O.$  преобразования ф-ции состояния можно записать как  $U = 1/2 R_{\nu\mu} \delta\omega_{\nu\mu}$ , где для четырёхкомпонентовой ф-ции фермиона  $\psi O. R_{\nu\mu}$  целком выражается с помощью Дирака матриц  $\gamma_\mu$  в виде  $R_{\nu\mu} = -R_{\mu\nu} = 1/4 (\gamma_\nu \gamma_\mu - \gamma_\mu \gamma_\nu)$ .

Дискретные преобразования  $U$  связаны не только с преобразованиями типа отражений в пространстве и времени, но и с изменением дискретных величин, таких как электрич. заряд, барионное число, странность, очарование, цвет и т. д. Приведём примеры  $O.$  дискретных преобразований, использующихся в теории релятивистских ферми-частиц,  $n$ -рые несложным образом выражаются через  $\gamma_\mu$ : пространственная инверсия ( $r' \rightarrow -r$ ,

$z'_0 = -z_0$ ) —  $U = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3$ , полная инверсия ( $r' \rightarrow -r$ ,  $z'_0 = z_0$ ) —  $U = i\gamma_5$ , где  $\gamma_5 = -i\gamma_0 \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3$ . Возможны и др. законы преобразования  $\psi$  при отражениях; напр.,  $r' \rightarrow -r$  возможны (помимо упомянутого) ещё три варианта преобразования волновой ф-ции:  $U = -i\gamma_0$ ,  $U = \pm \gamma_0$  (так преобразуются при отражениях  $\psi$ -функции на, левосдвинутом). Аналогичные варианты существуют и для законов преобразования при др. отражениях. К дискретным преобразованиям примыкает операция *зарядового сопряжения*, имеющая вид  $U_C = \alpha = \gamma_0 \beta$ .

$O.$  перестановок. Такие  $O.$  необходимы при рассмотрении систем двух и более одинаковых частиц. С помощью простейшего  $O.$  перестановки индексов двух частиц

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{ij} \psi(x_1, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_N) &= \\ &= \psi(x_1, \dots, x_j, \dots, x_i, \dots, x_N) \end{aligned}$$

можно построить любой  $O.$  перестановки  $\mathcal{P}$  этих индексов, представив его как произведение парных перестановок:  $\mathcal{P} = \mathcal{P}_{ij}$ . Оператор  $\mathcal{P}_{ij}$  линейен,

$$\mathcal{P}_{ij}(\psi + \psi') = \mathcal{P}_{ij}\psi + \mathcal{P}_{ij}\psi',$$

симметричен,  $\mathcal{P}_{ij} = \mathcal{P}_{ji}$ , совпадает с обратным,  $\mathcal{P}_{ij}^{-1} = \mathcal{P}_{ij}$ , унитарен,  $\mathcal{P}_{ij}^2 = I$ . Т. к. в системе одинаковых частиц  $O.$  перестановки их индексов не изменят ни  $O.$  динамики, величин (в частности, гамма-тонна система  $\hat{H}$ , т. е.  $\hat{H} \mathcal{P} = \mathcal{P} \hat{H} = 0$ ), ни граничных и др. дополнит. условий, то волновые ф-ции  $\psi$  и  $\mathcal{P}_{ij}\psi$ , отличающиеся расположением двух индексов частиц у их аргументов, удовлетворяющие одной и той же системе ур-ний и дополнит. условий, описывают одно и то же микроскопич. состояние, т. е.  $\mathcal{P}_{ij}\psi = \lambda \psi$ , где  $\lambda = \exp(i\alpha)$  — фазовый множитель. Повторное применение к этому соотношению  $O. \mathcal{P}_{ij}$  определяет для собств. значения  $\lambda O. \mathcal{P}_{ij}$  условие  $\lambda^2 = 1$ , т. е.  $\lambda = \pm 1$  — ф-ция состояния системы одинаковых частиц по отношению к перестановкам их индексов либо симметрична,  $\mathcal{P}\psi = \psi$  (случай системы бозе-частиц), либо антисимметрична,  $\mathcal{P}\psi = (-1)^l \psi$  (случай системы ферми-частиц), где  $l$  — число парных перестановок  $\mathcal{P}_{ij}$ , на к-рые распадается данная перестановка  $\mathcal{P}$ . При этом

виду того, что  $[\hat{H}, \mathcal{P}] = 0$ , характер симметрии волновой ф-ции является пост. свойством данной системы. Для двух ферми-частиц  $O.$  перестановки имеет вид  $\mathcal{P}_{12} = \mathcal{P}_{12}(0) \mathcal{P}_{12}(\tau) \mathcal{P}_{12}(\tau)$ , где  $\mathcal{P}_{12}(0)$ ,  $\mathcal{P}_{12}(\tau)$ ,  $\mathcal{P}_{12}(\tau)$  — соответственно  $O.$  обмена спинами, зарядами и координатами. Т. к. для ферми-систем  $\mathcal{P}_{12} = -1$ , то для  $O.$  перестановки фермионов местами  $\mathcal{P}_{12}(\tau) = -\mathcal{P}_{12}(0) \mathcal{P}_{12}(\tau)$ , где  $\mathcal{P}_{12}(0) = 1/2(1 + \sigma_1 \sigma_2)$ ,  $\mathcal{P}_{12}(\tau) = 1/2(1 + \tau_1 \tau_2)$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  — матрицы Паули, действующие на спиновые переменные в частиц, а  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  — совпадающие по виду с матрицами Паули операторы *изотопического спина*.

$O.$  проектирования вводятся при необходимости выделить из всего класса допустимых волновых ф-ций  $\Psi(x)$  подпространство ф-ций  $\psi(x)$ , удовлетворяющих определённым дополнит. требованиям (напр., подпространство ф-ций с к.-л. дополнит. ограничением на числа заполнения или ф-ций, ортогональных к заданной, и т. д.). Вследствие принципа суперпозиции любую  $\Psi(x)$  можно представить как  $\Psi(x) = c\psi(x) + \psi'(x)$  и выделить первое слагаемое с помощью проекционного  $O. P_\psi$ , определив его как  $P_\psi \Psi = c \psi$ , где

$$c = \int \psi^*(x) \Psi(x) dx, \quad \int \psi^*(x) \psi(x) dx = 1.$$

Из свойств  $P_\psi$  отметим его линейность и свойство  $P_\psi^2 = P_\psi$ . Ввиду отсутствия взаимной однозначности в сопоставлении  $\Psi \rightarrow \psi$ ,  $O.$  проектирования  $P_\psi$  не имеет обратного себе  $O. P_\psi^{-1}$ . Следует отметить, что  $O.$  матрицы плотности  $\rho$  по природе своей является проекци-

онным  $O$ . — для чистого состояния  $\Phi$ , когда  $\langle n' | \rho | n \rangle = \delta_{n'n}$ , он просто совпадает с  $O$ . проектирования на это состояние:  $R\Phi = \rho$ .

Лит. см. при ст. *Квантовая механика, Квантовая теория многих частиц, Квантовая теория поля, Квантовая хромодинамика*. И. А. Бласкович.

**ОПЕРАЦИИ СИММЕТРИИ** (преобразования симметрии) — пространств, преобразования объекта (кристалла), при  $k$ -рых он совмещается сам с собой. К  $O$ . с. относятся: поворот вокруг оси симметрии, отражение от плоскости симметрии, инверсия относительно центра симметрии, зеркальный поворот вокруг оси симметрии, а также операции дискретных переносов — трансляций. Совокупность  $O$ . с. данного объекта является его группой симметрии. Подробнее см. *Симметрия кристаллов*.

**ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ** — усилитель электрических колебаний (УЭК) с внеш. цепями, предназначенный для выполнения нек-рых линейных операций (суммирование, интегрирование, дифференцирование и др.). Часто название « $O$ . у.» относят к самим УЭК, к-рые обычно выполняются в виде серийно выпускаемых микросхем. Структурная схема типового  $O$ . у. содержит входной дифференц. каскад, осн. усилитель и выходной каскад с малым выходным сопротивлением.  $O$ . у. имеет два входа: неинвертирующий (+) и инвертирующий (-); соответственно входное напряжение усиливается без смены или со сменой полярности.  $O$ . у. питается от источника биполярного (симметричного относительно корпуса) напряжения  $\pm E$ .

Гл. требования, предъявляемые к характеристикам  $O$ . у.: высокий коэф. усиления  $k = 10^3 - 10^6$ ; большое входное сопротивление  $R_{вх}$  (до 100 Ом) и малое выходное сопротивление  $R_{вых}$  ( $\sim 10^2$  Ом); нулевое значение выходного напряжения при нулевом входном и симметричное уменьшение выходного напряжения в обе стороны в нек-ром диапазоне  $\pm U_{max}$ , близком к  $\pm E$ ; малый дрейф нуля, обусловленный изменениями внеш. условий и нестабильностью эдс источника; малый уровень собств. шумов; сильное ( $\sim 60$  дБ) подавление синфазной составляющей, т. е. малое значение отношения выходного напряжения к входному, поданному одновременно на оба входа; широкая полоса пропускания (от 0 до 100 МГц). Выполнение этих требований обеспечивает возможность каскадного включения  $O$ . у., высокую точность выполнения операций и универсальность применения. Обычно УЭК охватывают отрицательной обратной связью с выхода на инвертирующий вход. Поскольку  $R_{вх}$  и  $k$  велики, в рабочем (линейном) режиме напряжения на обоих входах  $O$ . у. практически одинаковы и почти не отличаются от 0 (виртуальный ноль).

В суммирующем  $O$ . у. при подаче сигналов на инвертирующий вход (рис. 1)

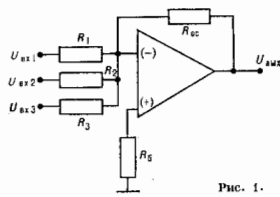


Рис. 1.

$$U_{вых} = -(R_1 U_{вх1} / R_{0c} + R_2 U_{вх2} / R_{0c} + R_3 U_{вх3} / R_{0c}).$$

К неинвертирующему входу иногда подключают балансирующий резистор  $R_6 \sim R_{0c}$ . Входное сопротивление такой схемы со стороны источника сигнала при одном входе  $U_{вх1}$ ,  $R_{вх} \sim R_1$ . При использовании неинвертирующего входа (рис. 2)  $U_{вых} = U_{вх}(1 + R_{0c}/R_1)$ . Посколь-

ку входное сопротивление такой схемы велико, её иногда используют для согласования выхода высокоомного генератора с низкоомной нагрузкой (при  $R_{0c} \ll R_1$  как повторитель напряжения).

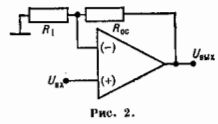


Рис. 2.

В схеме, изображенной на рис. 3,  $U_{вых} = -R_{0c} U_{вх} / (R_1 + R_2 + R_1 + R_{0c}) U_{вх} / R_1 (R_2 + R_3)$  при  $R_1 = R_2 = R_{0c}$ ,  $U_{вых} = U_{вх2} - U_{вх1}$  (дифференц. схема).

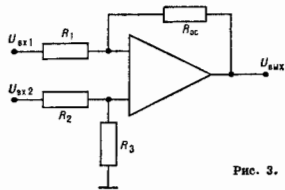


Рис. 3.

С помощью  $O$ . у. можно осуществить операции интегрирования и дифференцирования (с одноврем. суммированием). В схеме интегрирования (рис. 4, а)

$$U_{вых} = -K_{ин} \int U_{вх1}(t) dt - K_{из} [U_{вх2}(t) dt,$$

где  $K_{ин} = 1/R_1 C_{0c}$ ,  $K_{из} = 1/R_2 C_{0c}$ . В схеме дифференцирования (рис. 4, б)

$$U_{вых} = -K_{д1} dU_{вх1}/dt - K_{д2} dU_{вх2}/dt,$$

где  $K_{д1} = R_{0c} C_1$ ,  $K_{д2} = R_{0c} C_2$  (см. также *Дифференцирующая цепь, Интегрирующая цепь*).

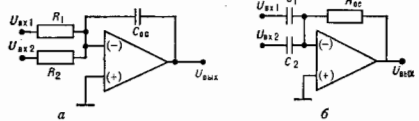


Рис. 4.

В схемах, приведенных на рис. 1—4, должен сохраняться линейный режим, т. е. напряжение на выходе не должно достигать границ  $\pm U_{max}$ . Используя комбинации внеш. элементов, строят модели реал. линейных динамич. систем (электронные аналоговые модели). В электронных схемах  $O$ . у. применяют для преобразования и фильтрации сигналов, в т. ч. импульсных (напр. для преобразования прямоугольных напряжений в пилообразные и обратно).  $O$ . у. применяют также для генерирования колебаний (в т. ч. импульсных), при этом используют нелинейные режимы  $O$ . у. (выходное напряжение за пределами  $\pm U_{max}$ ).  $O$ . у. используют также в аналоговых вычислит. машинах, где с их помощью выполняют линейные операции и нелинейные преобразования (возведение в степень, перемножение и др.). Иногда используют также гидравлич., пневматич., магн. и др.  $O$ . у.

Лит.: Алексеев А. Г., Шагури И. И., Микросхемотехника, М., 1982. В. Х. Иривичий.

**ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ** — потенциалы, изменения к-рых в точке наблюдения опережают по времени изменения источников. Если последние считать причиной, а первые — следствием, то  $O$ . п. не удовлетворяют классич. принципу причинности, согласно к-рому причина, вызывающая к-л. движение, должна предшествовать совершению этого движения.

Однако, если отвлечься от критерия причинности, то О. п. часто являются решениями, формально равноправными с западающими потенциалами. Впервые О. п. были введены для полей, возбуждаемых зарядами и токами в вакууме. В частности, неоднородное волновое уравн. описывающее поведение скалярного потенциала  $\phi$  при изменении плотности заряда  $\rho$ ,

$$\Delta\phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} = -4\pi\rho, \quad (1)$$

имеет два равноправных частных решения:

$$\phi_{\pm}(r, t) = \int \frac{\rho(r', t' \mp |r - r'|/c)}{|r - r'|} dV', \quad (2)$$

где верхний знак относится к западающим потенциалам, а нижний — к О. п. Существует нек. критерий отбора физически реализуемых решений, не сводящихся к чисто словесным обращениям к принципу ирривантности. Один из них состоит в формулировке условий излучения при неограниченном удалении от источника, позволяющих исключать поля, привносящие энергию извне, т. е. от др., несуществующих источников. Этот критерий удобен для задач типа (1), (2), описывающих поля в вакуумно-подобных, т. е. однородных недиспергирующих средах. Др. критерий, более универсальный, применимый к более общим, чем (1), (2), моделям, состоит во внесении (формальном) в окружающую среду небольшого неомогат. поглощения и наз. иногда принципом предельного поглощения. Небольшое поглощение тоже исключает решения типа О. п., к-рые могут имитироваться решениями типа западающих потенциалов, создаваемых бесконечно удалёнными источниками. Наконец, наиб. общим критерием, применяемым и к нестационарным средам, является обращение к задаче Коши о включении источника с постепенным выходом его на нужный режим зависимости от времени.

Существуют, однако, ситуации, в к-рых О. п. не противоречат принципам причинности и должны фигурировать в физически осуществимых решениях. Так, в средах с аномальной дисперсией возможно существование т. н. обратных волн (гармонических или квазигармонических), фазовые и групповые скорости к-рых направлены противоположно. В этом случае решение, уносящее энергию от источника (критерий излучения Манделштама), формально записывается через потенциалы, фазовые фронты к-рых сбегают в направлении к источнику, а не «убегают» от него. В сложных дисперсионных средах с пространств. и временной дисперсией возможны случаи одновременно, привлечения решений с западающими и О. п.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; Боголюбовский Б. М., Столяров С. Н., Современное состояние электродинамики движущихся сред (географич. среды), в кн.: Зингеровский сборник, 1974, М., 1976; Излучения условия, в кн.: Математическая физика, т. 2, М., 1976. М. А. Миллер, Е. В. Суверов.

**ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ** (детерминант) квадратной матрицы  $A$  порядка  $n$ ,  $\det A$  — многочлен, каждый член к-рого является произведением  $n$  элементов матрицы  $A$ , причём в каждой строке и каждого столбца матрицы в произведении входит лишь один сомножитель, т. е. многочлен вида  $\det A = \sum (-1)^{\sigma} a_{1j_1} a_{2j_2} \dots a_{nj_n}$ , где сумма берётся по всем перестановкам  $j_1, j_2, \dots, j_n$  чисел 1, 2, ...,  $n$ ; число  $a$  равно числу инверсий в перестановке  $j_1, j_2, \dots, j_n$ , т. е. числу случаев, когда большее число стоит перед меньшим. О. содержит  $n!$  членов, из к-рых половина берётся со знаком  $+$  и половина со знаком  $-$ . Число  $n$  наз. порядком О. Определитель матрицы  $A$  обозначается также  $|A|$  или  $|a_{ij}|$ . О. обладают рядом важных свойств, к-рые облегчают их вычисление. 1) Величина  $\det A$  не изменяется: а) если строки и столбцы  $A$  поменять местами, т. е.  $\det A = \det A'$ , где  $A'$  — матрица, транспонированная к  $A$ ; б) при четном числе перемест. любых двух строк (столбцов)  $A$ ; в) если к элементам любой строк (столбца) прибавить соответствующие

элементам другой строк (столбцов) соответственно  $\lambda$  раз, умноженные на одно и то же число. 2) О. меняет знак, если в  $A$  проинтерсти нечётное число перемест. любых двух строк (столбцов). 3) О. равен нулю, если: а) все элементы к.-л. строк (столбцов) равны нулю; б) соответствующие элементы к.-л. двух строк (столбцов) равны или пропорциональны. 4) Общий множитель всех элементов строк (столбца) можно вынести за знак О. 5) Если какой-либо элемент к.-л. строки (столбца) есть сумма двух слагаемых, то О. равен сумме двух О., причём в одном из них соответствующая строка (столбец) состоит из первых слагаемых, а в другом — из вторых слагаемых. 6) О. можно разложить по элементам к.-л. строки (столбца). Напр., разложение О. по элементам  $i$ -й строки имеет вид:  $|A| = a_{i1}A_{i1} + a_{i2}A_{i2} + \dots + a_{in}A_{in}$ . Коэф.  $A_{ij}$  — алгеб. след. при элементе  $a_{ij}$  в этом разложении наз. алгеб. след.  $A_{ij}$  и с к. е. к.  $A_{ij}$  равно произведению  $(-1)^{i+j}$  на О. порядка  $n-1$ , полученный из данного О. вычеркиванием  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца. 7) Из определения произведения матриц следует, что  $\det(AB) = \det A \det B$ , где  $A$  и  $B$  — квадратные матрицы одного и того же порядка. 8)  $\det A^* = \det A = (\det A^*)^*$ ,  $\det A^{-1} = (\det A)^{-1}$  при  $\det A \neq 0$  ( $A^*$  — матрица, эрмитово сопряжённая к  $A$ , \* — комплексное сопряжение).

Нек-рые спец. О.: для ф-ции  $f(x_1, \dots, x_n)$  гесссианом наз.  $|\partial^2 f / \partial x_i \partial x_j|$ , для  $n$  ф-ций  $f_1(x_1, \dots, x_n)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) якобианом наз. О.  $|\partial f_i / \partial x_j|$ , определителем Вронского наз. О. матрицы, в к-рой элементами первой строки являются  $n$  функций  $v_1(x), v_2(x), \dots, v_n(x)$ , а их к-рое производные являются элементами  $(k+1)$ -й строки ( $k = 1, 2, \dots, n-1$ ). Определителем Грама наз. О. матрицы, элементы к-рой — скалярные произведения  $(u_i, u_j)$   $n$  векторов  $u_1, \dots, u_n$  в пространстве размерности  $n$ . Лит. см. при ст. Матрица. С. И. Азаков.

**ОПТИКА** (от греч. *optiké* — наука о зрительных восприятиях) — раздел физики, в к-ром изучаются оптическое излучение (свет), его распространение и явления, наблюдаемые при взаимодействии света и вещества. Оптич. излучение представляет собой эл.-магн. волны, и поэтому О. — часть общего учения об эл.-магн. поле. Оптич. диапазон длин волн  $\lambda$  охватывает ок. 20 октан и ограничен с одной стороны пертг. лучами, а с другой — микроволновым диапазоном радиолучения. Такое ограничение условно и в значит. степени определяется общностью техн. средств и методов исследования явлений в указанном диапазоне. Для этих средств и методов характерны формирование оптич. изображений предметов, основанное на волновых свойствах излучения, с помощью приборов, линейные размеры к-рых много больше длины волны  $\lambda$  излучения, а также применение приёмников света, действие к-рых основано на квантовых свойствах (см. ниже). По традиции О. принято подразделять на геометрическую, физическую и физиологическую.

**Геометрическая О.**, не рассматривая вопрос о природе света, исходит из эмпирич. законов его распространения и использует представление о световых лучах, преломляющихся и отражающихся на границах сред с разными оптич. свойствами и прямилинейных в оптич. смысле однородной среде.

Методы геом. О. позволяют изучать условия формирования оптич. изображений объекта как совокупности изображений отд. его точек и объяснить мн. явления, связанные с прохождением оптич. излучения в разл. средах, в т. ч. неоднородных (напр., искривление лучей в земной атмосфере вследствие неопостоянства её показателя преломления, образование миражей, радуг). Наиб. значение геом. О. (с частичным привлечением волновой О., см. ниже) имеет для расчёта и конструирования оптич. приборов — от очковых линз до сложных объективов и огромных астр. инструментов. Благодаря развитию вычислит. математики и применению совр.

вычислит. техники такие расчёты достигли высокого совершенства и сформировалось отд. направление, получившее назв. вычислительной опти.

По существу отбрасывается от физ. природы света и *фотометрия*, посвящённая гл. обр. измерению световых величин. Фотометрия представляет собой методич. основу исследования процессов испускания, распространения и поглощения излучения по результатам его действия на приёмники излучения. Ряд задач фотометрии решается с учётом закономерностей восприятия человеком светового сигнала и его отд. цветовых составляющих. Изучением самих этих закономерностей занимается физиологич. опти., смыкающаяся с биофизикой и психологией и исследующая механизмы зрения.

Физическая опти. рассматривает проблемы, связанные с процессами испускания света, природой света и световых явлений. Утверждение, что свет есть поперечные эл.-магн. волны, явилось результатом огромного числа эксперим. исследований *дифракции света*, *интерференции света*, *поляризации света*, распространения света в анизотропных средах (см. *Кристаллооптика*, *Оптическая анизотропия*). Совокупность явлений, в к-рых проявляется волновая природа света, изучается в крупном разделе физ. опти. — *волновой оптике*. Её темат. основанием служат общ-ур-ная классиф. электродинамики — *Максвелла уравнения*. Свойства среды при этом характеризуются макроскопич. материальными константами — значениями *диэлектрической проницаемости*  $\epsilon$  и *магнитной проницаемости*  $\mu$ , входящими в ур-ния Максвелла в виде коэффициентов. Эти значения однозначно определяют показатель преломления среды:  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ .

Феноменологич. волновая опти., оставляемая в стороне вопрос о связи величин  $\epsilon$  и  $\mu$  (определяемых экспериментально) со структурой вещества, позволяет объяснить все эмпирич. законы геом. опти. и установить границы её применимости. В отличие от геометрической, волновая опти. даёт возможность рассматривать процессы распространения света не только при размерах формирующих (или рассеивающих) световые лучи систем, значительно больших длины волны излучения, но и при любом соотношении между ними. Во мн. случаях решение конкретных задач методами волновой опти. оказывается чрезвычайно сложным. Поэтому получила развитие *квантовая опти.*, в к-рой процессы распространения, преломления и отражения волновых пучков с сечением  $\gg \lambda$  описываются геометрически, но учитываются дифракц. вклады и тем самым волновая природа излучения. Формально такой геом. и волновой подходы также объединяются в геом. теории дифракции, в к-рой дополнительно к падающим, отраженным и преломлённым лучам геом. опти. постулируется существование дифракцир. лучей.

Огромную роль в развитии волновой опти. сыграло установление связи величин  $\epsilon$  и  $\mu$  с молекулярной и кристаллич. структурой вещества. Оно позволило выйти далеко за рамки феноменологич. описания оптич. явлений и объяснить все процессы, сопровождающие распространение света в рассеивающих и анизотропных средах и вблизи границ разделов сред с разными оптич. характеристиками, а также зависимость от  $\lambda$  оптич. свойств сред (дисперсию), влияние на световые явления в средах темп-ры, давления, звука, электрич. и магн. полей и мн. др.

В классич. волновой опти. параметры среды считаются не зависящими ни от интенсивности света, ни от времени; соответственно, оптич. процессы описываются линейными дифференц. ур-ниями с пост. коэффициентами. Однако во мн. случаях, особенно при больших интенсивностях световых потоков, это предположение несправедливо: показатель преломления зависит от напряжённости поля световой волны (нелинейная поляризуемость вещества). Это приводит к совершенно новым явлениям и закономерностям, таким как изменение угла прелом-

ления светового пучка на границе двух сред при изменении его интенсивности, сжатие и расширение световых пучков (самофокусировка света и его самодефокусировка), изменение спектрального состава света, проходящего через нелинейную среду (генерация оптич. гармоник), взаимодействие световых пучков в результате модуляции светом величин  $\epsilon$  и  $\mu$  и появление в излучении комбинац. частот (параметрич. явления, см. *Параметрический генератор света*) и т. д. Эти явления рассматриваются *нелинейной оптикой*, получившей большое практ. значение в связи с созданием лазеров.

Хорошо описывая распространение света в материальных средах, волновая опти. не смогла удовлетворительно объяснить процессы его испускания и поглощения. Исследование этих процессов (*фотоэффекта*, фотохим. превращений молекул, закономерностей *спектров оптических* и пр.) в общие термодинамич. соображения о взаимодействии эл.-магн. поля с веществом привели к выводу, что элементарная система (атом, молекула) может испускать или поглощать энергию эл.-магн. поля лишь дискретными порциями (квантами), пропорциональными частоте излучения (в см. *Излучение*). Поэтому световому эл.-магн. полю сопоставляется поток квантов света — фотонов, распространяющихся в вакууме со скоростью света. В простейшем случае энергии, теряемая или приобретаемая изолиров. квантовой системой при взаимодействии с оптич. излучением, равна энергии фотона  $h\nu$ , а в более сложном — сумме или разности энергий виск. фотонов (см. *Многочисленные процессы*). Эффекты, в к-рых при взаимодействии света и вещества проявляются квантовые свойства элементарных систем, рассматриваются *квантовой оптикой* методами, развитыми в квантовой механике и квантовой электродинамике.

Двойственность природы света — наличие у него одновременно характерных черт, присущих и волнам, и частицам, — является частным случаем *корпускулярно-волнового дуализма*. Эта концепция была впервые сформулирована именно для оптич. излучения; она утверждалась как универсальная для всех частей микромира после обнаружения волновых свойств у материальных частиц (см. *Дифракция частиц*) и лишь затем была экспериментально подтверждена для радиополучения (*квантовая электроника*). Открытие квантовых явлений в радиодиапазоне во многом стерло резкую границу между радиофизикой и оптикой. Сначала в радиодиапазоне, а затем в физ. опти. сформировалось новое направление, связанное с генерированием вынужденного излучения и созданием квантовых усилителей и квантовых генераторов излучения (*мазеров и лазеров*). В отличие от неупорядоченного светового поля обычных (тепловых и люминесцентных) источников, излучение лазеров обладает большой временной и пространств. упорядоченностью (*когерентностью*), высокой монохроматичностью ( $\Delta\nu/\nu$  достигает  $\sim 10^{-14}$ , см. *Монохроматическое излучение*), предельно малой, почти *дифракционной* расходимостью пучка и при фокусировке позволяет получать недоступные ни для каких др. источников выдержанности электрич. поля, превышающие внутриатомные. Появление лазеров стимулировало пересмотр и развитие традиционных и возникновение новых направлений физ. опти. Оказалось возможным практически реализовать идеи *голографии*, большую роль стали играть исследования статистики излучения (*статистическая оптика*), сформировалась как самостоят. раздел нелинейной оптики, получили развитие методы создания узконаправленных когерентных пучков света и управления ими (*когерентная опти.*), в т. ч. методы и средства автоматич. управления оптич. системами, позволяющие компенсировать искажения световых пучков, проходящих через неоднородные среды (*адаптивная оптика*). В этом плане большой интерес представляет обнаруженное в технич. реализованное в разл. вариантах явление *обращения волнового фронта*. Особую важность приобрело изучение круга явлений, связанных с воздействием интенсивных световых потоков на вещество, 419



и начала быстро развиваться лазерная технология. Развитие лазерной техники привело к новому подходу при создании оптич. элементов и систем и, в частности, потребовало разработок новых оптич. материалов, пропускающих без их повреждений интенсивные световые потоки (с и л о в а О.).

**Практические применения.** Все разделы О. имеют и имеют многочисл. практич. применение. Задачи рационального освещения улиц, помещений, рабочих мест на производстве, зрелищ, историч. и архитектурных памятников и пр. решаются светотехникой на основе геом. О. и фотометрии с учётом законов физиологич. О.; при этом используются достижения физ. О. (напр., для создания люминесцентных источников света) и оптич. технологии (изготовление зеркал, светофильтров, экранов и т. д.). О. решает задачи получения в разл. спектральных областях изображений, соответствующих оригиналам как по геом. форме, так и по распределению яркости. Геом. О. с привлечением физ. О. даёт ответ на вопрос, как следует построить оптич. систему, чтобы каждая точка объекта изображалась также и в виде точки при сохранении геом. подобия изображения объекту. Она указывает на источники искажений изображения и их уровень в реальных оптич. системах (см. *Аберрации оптических систем*).

Возможности получения оптич. образов без применения фокусирующих систем рассматривает голография, в основу к-рой положена идея об однозначной связи формы тела с пространственным распределением амплитуды и фазы распространяющихся от него (рассеянных им) световых волн. Для регистрации распределения амплитуды и фаз поля в голографии используется монохроматич. излучение. Поэтому бурное развитие голографии связано с открытиемся в результате разработок лазеров возможностями получать интенсивные когерентные оптич. поля, а также с её широким практич. применением (изучение плазм, исследование деформации тел, распознавание образов, обработка информации и т. д.). Оптич. явления и методы, разработанные в О., широко применяются для анализа, целей и контроля в самых различных областях науки и техники. Особенно большое значение имеют методы *спектрального анализа* и *люминесцентного анализа*, основанные на связи спектров испускания, поглощения и рассеяния со структурой атомов и молекул и внутри- и межмолекулярными взаимодействиями. По виду спектров и их изменению со временем или под действием на вещество выпл. факторов можно установить атомный и молекулярный состав, агрегатное состояние и внутр. структуру вещества, проследить за кинетикой и деталями протекающих в нём физ. и хим. процессов. Совр. развитие спектроскопии тесно связано с использованием лазеров, к-рые не только расширили возможности её классич. разделов, но и привели к развитию нового направления — *линейной и нелинейной лазерной спектроскопии*. Достижения в области генерирования сверхкоротких (пико- и фемтосекундных) световых импульсов определили прогресс *спектроскопии наноосекундных импульсов*, позволяющей исследовать кинетику биологич. процессов, происходящих внутри- и межмолекулярных процессов, в частности в биол. объектах. Большое практич. значение имеет дистанц. зондирование атмосферы с помощью лазерных устройств (ладары) и определение присутствия в ней малых примесей разл. веществ.

Уникальной чувствительностью обладают измерит. устройства, использующие интерференцию света. *Интерферометры* широко применяют для измерений длин волн и изучения структуры спектральных линий, определения показателей преломления прозрачных сред, абс. и относит. измерений длин, измерений угл. размеров звёзд и др. космич. объектов. В промышленности интерферометры используют для контроля качества и формы поверхностей, регистрации небольших смещений, обнаружении по малым изменениям показателя преломления неустойчивости темп-ры, давления или состава

вещества и т. д. Созданы лазерные интерферометры с уникальными характеристиками, расширяющие возможности интерференц. методов за счёт большой мощности и высокой монохроматичности излучения лазеров.

Явление поляризации света лежит в основе ряда методов исследования структуры вещества с помощью многочисл. *поляризационных приборов*. По изменению степени поляризации (деполяризации) света при рассеянии и люминесценции можно судить о телесных и структурных флуктуациях в веществе, флуктуациях концентрации растворов, о внутри- и межмолекулярной передаче энергии, структуре и расположении излучающих центров и т. д. Широко применяются *поляризационно-оптический метод исследования напряжений*, возникающих в твёрдых телах (напр., при механич. нагрузках), по изменению поляризации прошедшего через тело света, а также метод исследования свойств поверхности тел по изменению поляризации при отражении света (*азимутометрия*). В кристаллооптике поляризация используется для изучения структуры кристаллов, в хим. промышленности — как контрольные при произ-ве оптич. активных веществ (см. *Сазариметрия*), в оптич. приборостроении — для повышения точности отсчётов приборов (напр., *фотомертр*).

Широкое распространение получили *дифракционные решётки* как диспергирующие элементы в спектральных приборах (монокроматорах, спектрографах, спектрофотометрах и др.) и как элементы резонаторов в лазерах с перестройкой частоты излучения. Они используются также в качестве ответвителей монохроматич. (лазерного) излучения (см. *Дифракционный ответвитель*), велика их роль в интервальных оптич. устройствах. Дифракция на ультразвуке в прозрачных средах позволяет определять упругие константы вещества, а также создавать акустич. *модуляторы света* (см. также *Акустооптика*), применяемые в светодальномерах, оптич. локаторах и системах оптической связи.

Оптич. методы, основанные на анализе рассеяния света, послужили одной из существенных основ становления молекулярной физики и её приложений. Так, фелометрия даёт возможность получать данные о межмолекулярном взаимодействии в растворах, определять размеры и молекулярную массу макромолекул полимеров, а также частот в коллоидных системах, взвесей и зольях. Ценные сведения о структуре уровней энергии молекул, их взаимодействии и строении вещества даёт изучение *комбинационного рассеяния света* и *Маньельштама — Бриллюана рассеяния*. Использование лазеров резко увеличило информативность спектроскопии рассеяния, привело к открытию вынужденных рассеяний и к развитию нового направления, основанного на воздействии лазерного излучения на, рассеивающих частиц (молекул) по энергич. состоянию (*активная лазерная спектроскопия*).

Чрезвычайно широка сфера практич. применения фотоэлектронных приборов, основанных на квантовой оптич. явлениях: фотодетекторы, *фотоэлектронные умножители*, фотодиоды, фотосопротивлений, *спектрально-оптический преобразователь*, передающих телевизионных трубок и т. д. Фотозонды используются не только для регистрации излучения, но и как устройства, преобразующие лучистую энергию Солнца в электрич. энергию (с о л н е ч н ы е б а т а р е и). Фоточувств. действие света лежит в основе фотографии и изучения в спец. области, пограничной между химией и О., — фотохимии. Именем оптич. свойств веществ под действием света (*фотохимия*) используется при разработках новых систем записи и хранения информации для нужд вычислит. техники и создания защитных светофильтров, автоматически увеличивающих поглощение света при возрастании его интенсивности. Получение мощных потоков монохроматич. лазерного излучения с разными динамич. видами открыло пути к разработке методов лазерного разделения изотопов и стимулирования направленного протекания хим. реакций, позволив-

ло О. найти новые, нетрадиц. применения в биофизике (воздействие лазерных световых потоков на биол. объекты на молекулярном уровне) и медицине. В технике использование лазеров привело к появлению оптич. методов обработки материалов (см., напр., *Лазерный отжиг*). Благодаря возможности с помощью лазера за короткое время концентрировать на площадках с линейными размерами  $\sim 40$  км большие мощности излучения интенсивно развивается оптич. метод получения высокотемпературной плотной плазмы с целью осуществления УТС (см. *Лазерный термоядерный синтез*).

Успехи О. стимулировали развитие *оптоэлектроники*. В её задачу входит разработка оптич. устройств для замены элементов и отд. блоков в вычислит. машинах, а также разработка новых подходов к решению задач вычислит. техники и обработки информации на основе принципов голографии и когерентной оптики. Техн. основой оптоэлектроники является *интегральная оптика*, предлагающая для решения её задач широкое использование волноводных систем и многофункциональных миниатюрных модулей с линейным и нелинейным преобразованием оптич. излучения. С появлением лазеров дальнейшее развитие получили оптич. дальнометры (см. *Светодальномер*), *оптическая локация* и *оптическая связь*. Оптич. дальнометры применяются в геодезии, практике, при строит. работах и пр. Методами оптич. локации было уточнено расстояние до Луны, ведётся слежение за ИСЗ; по линиям лазерной оптич. связи ведутся телефонные переговоры и передаются изображения. Создание световодов с малым затуханием позволило за собой практич. разработку систем кабельной оптич. связи, имеющей ряд преимуществ по сравнению с элктрич. проводной связью.

**Физиологическая О.** изучает строение и функционирование всего аппарата зрения — от глаза до коры мозга; разрабатывает теория зрения, восприятия света и цвета. Результаты физиолог. О. используются в медицине, физиологии, технике при разработке разнообразных устройств — от осветит. приборов и очков до цветного кино и телевидения. (Подробнее см. в ст. *Физиологическая оптика, Зрение, Колориметрия*.)

**Исторический очерк.** Древние греки (Аристотель, Платон, Евклид) нашли законы прямолинейного распространения и отражения света. В ср. века стали известны эмпирич. правила построения изображений, даваемых линзами; ок. 1590 З. Янсен (Z. Jansen) построил первый двухлинзовый микроскоп; в 1609 Г. Галилей (G. Galilei) изобрёл телескоп. Точные законы преломления света были экспериментально установлены ок. 1620 В. Шнеллусом (W. Snellius, см. *Синяя записка преломления*) и в 1637 П. Декартом (P. Descartes). Последующий формулировкой *Ферма принципа* (1660) был завершён фундамент построения геом. О.

Дальнейшее развитие О. связано с открытиями дифракции и интерференции света [Ф. Гримальди (F. M. Grimaldi), опубликовано в 1665], двойного лучепреломления [Э. Бартолин (E. Bartolin), 1669] и с работами И. Ньютона (I. Newton), Р. Гука (R. Hooke) и Х. Гюйгенса (Ch. Huygens). Ньютон обращал большое внимание на периодичность световых явлений и допускал возможность их волновой интерпретации, но отдавал предпочтение корпускулярной концепции света, считая его потоком частиц, действующих на эфир. Движением световых частиц через эфир переменной плотности и их взаимодействием с материальными телами, по Ньютону, обусловлены преломление и отражение света, цвета тонких плёнок, дифракция света и его дисперсия. Именно Ньютон осознал поляризацию как «начальное» свойство света, объясняемое определ. ориентацией световых частиц по отношению к образуемому лучу. Х. Гюйгенс полагал, что световое возбуждение есть импульсы упругих колебаний эфира, распространяющиеся с большой, но конечной скоростью. Первое её эксперим. определение провёл в 1676 О. Рёмер

(O. Ch. Rømer, см. *Скорость света*). Наиб. вкладом Гюйгенса в О. является *Гюйгенс — Френель принцип*, а также объяснение *двойного лучепреломления*. Однако Гюйгенс не разработал последовательно волновую теорию света, к-рая выдержала бы противопоставление воззрениям Ньютона.

Победой О. связана с работами Т. Юнга (Th. Young) и О. Френеля (A. J. Fresnel). В 1801 Юнг сформулировал принцип интерференции, позволивший ему объяснить цвета тонких плёнок (см. *Полосы равной толщины*). Опираясь на этот принцип, Френель по-новому истолковал принцип Гюйгенса, дал удовлетворит. волновое объяснение прямолинейности распространения света и объяснил многочисл. дифракц. явления. В опытах Френеля и Араго (D. F. Arago) было установлено, что волны, поляризованные перпендикулярно друг другу, не интерферируют; это стало основанием высказать идею о поперечности световых колебаний, исходя из к-рой Френель построил теорию кристаллооптич. явлений. Т.о., все известные к тому времени оптич. явления получили волновую интерпретацию. Детальная разработка представлений о свете как поперечных упругих колебаниях эфира привела к необходимости искусств. теоретич. построения (так, эфир являлся свойствами твёрдого состояния и в то же время допускал, что в нём могут свободно перемещаться тела). Эти трудности были разрешены при последоват. развитии учения Дж. К. Максвелла (J. C. Maxwell) об эл.-магн. поле. Основываясь на открытии М. Фарадея (M. Faraday), Максвелл пришёл к выводу, что свет есть эл.-магн., а не упругие волны.

Первым указанием на непосредств. связь электромагнетизма с О. было открытие Фарадемом (1848) *вращения плоскости поляризации* света в магн. поле (*Фарадева эффект*). Далее было установлено, что отношение эл.-магн. и электростатич. единиц силы тока по абс. величине и размерности совпадает со скоростью света  $c$  [В. Вебер (W. Weber) и Ф. Кольрауш (F. Kohlrausch), 1856]. Максвелл теоретически показал, а Г. Герц (H. R. Hertz) в 1888 подтвердил экспериментально, что изменения эл.-магн. поля распространяются в вакууме именно с этой скоростью. В прозрачной среде скорость света  $v = c/n = c/\sqrt{\epsilon\mu}$ , т.е. определяется диэлектрич. и магн. проницаемостями среды. Открытие в 1862 Ф. Леру (F. P. Leroux) аномальной дисперсии, к-рая связана с поглощением света, привело к представлению о веществе как совокупности осцилляторов, с к-рыми взаимодействует свет (В. Зельмeyer, 1872). В 90-х гг. 19 в. П. Друде (P. Drude), Г. Гельмгольц (H. Helmholtz) и Х. Лоренц (H. A. Lorentz) при разработке электронной теории строения вещества объединили идею об осцилляторах и эл.-магн. теорию света. Представление об электронах как об осцилляторах, к-рые входят в состав атомов и молекул и способны совершать в них колебания, позволяло описать мн. оптич. явления, в т.ч. нормальную и аномальную дисперсию. Подтверждением представлений о том, что излучение и поглощение света определяются поведением электронов в атомах, явилось открытие в 1896 П. Зеemanом (P. Zeeman) и истолкование в 1897 Лоренцем действия магн. поля на частоты излучения и поглощения атомов (*Зеемана эффект*). В полном согласии с теорией Максвелла оказалась и величина *давления света*, измеренная П. Н. Лебедевым в 1899. Эл.-магн. теория света стала отрываемым нуктом и при создании *относительности теории*. Подтверждением классич. электродинамич. теории света Максвелла — Лоренца неоднократно подтверждалась и в дальнейшем, напр. при истолковании И. Е. Таммом и И. М. Франком (1937) эффекта *Черенкова — Вавилова излучения*, в движении Д. Габором (D. Gabor, 1947) идеи *голографии* (с записью волнового поля в одной плоскости), в разработке оригинального направления трёхмерной голографии, начало к-рому положили работы Ю. Н. Денсюка (1962), и т.д.

Электродинамич. теория, однако, оказалась недостаточной для описания процессов поглощения и испускания света. М. Планк (M. Planck), анализируя спектры излучения абсолютно чёрного тела, пришёл к заключению (1900), что элементарная колебат. система (атом, молекула) отдаёт волновую энергию эл.-магн. поля или получает её от него не непрерывно, а порциями, пропорциональными частоте колебаний, — квантами. Работы Планка и А. Эйнштейна (A. Einstein, 1905), в-рый приписал квантам кроме энергии также импульс и массу, вернули О. мн. черты корпускулярных представлений. Интенсивность эл.-магн. поля в квантовой О. определяет вероятность обнаружения фотона, а структура поля отражает квантовую структуру ансамбля элементарных излучателей (атомов, молекул) и распределение актов излучения во времени. Т. о., при сохранении физ. смысла поля фотоны, возникающие при актах испускания света и существующие только при движении со скоростью света, приобрели черты материальных частиц. Фотонные представления позволили Эйнштейну объяснить ос. законы фотозффекта, впервые исследованные А. Г. Столетовым в 1888—90; они дают наглядное истолкование существованию КВ-границы в тормозном излучении электронов, Комптона фотэффекту, открытому в 1923, стоксову сдвигу частоты излучения фотолуминесценции, комбинац. рассеяния света [открытому в 1928 Л. И. Манделштамом и Г. С. Ландсбергом и независимо Ч. В. Раманом (Ch. V. Raman)] и др. явлениям взаимодействия света с веществом.

В совр. О. квантовые представления не противопоставляются волновым, а сочетаются на основе квантовой механики и квантовой электродинамики. Квантовая теория позволила дать интерпретацию спектрам атомов, молекул и ионов, объяснить воздействие электрич., магн. и акустич. полей на спектры, установить зависимость характера спектра от условий возбуждения и т. д. Примером обратного влияния О. на развитие квантовой теории может служить открытие собств. механч. момента — спина — и связанного с ним собств. магн. момента у электрона и др. частиц, повлёкшее за собой установление Паули принципа (1926) и истолкование сверхтонкой структуры спектров [В. Паули (W. Pauli), 1928].

Наиб. важное событие совр. Ф. — эксперим. обнаружение и создание методов генерации вынужденного излучения атомов и молекул. Вынужденно испущенный фотон дублирует фотон, вызвавший переход, и, если имеется активная среда с инверсной населённостью, этот процесс может многократно повториться — происходит усиление нсч. светового потока. Добавление к такому квантовому усилителю оптич. обратной связи превращает его в оптич. квантовый генератор (лазер). Первые квантовые генераторы (в сантиметровом диапазоне длин волн — лазеры) были созданы А. М. Прохоровым, Н. Г. Басовым и Ч. Таунсом (Ch. H. Townes) в 1954. В наст. время (90-е гг.), используя разл. методы получения инверсной населённости, строят лазеры на твёрдых, жидких, газообразных и плазменных средах. Их появление стимулировало дальнейшее развитие традиц. областей О. и привело к возникновению совершенно новых научных и техн. направлений (ислинейная и параметрич. О., оптич. обработка материала), сделало возможным практич. реализацию и широкое применение ранее высказанных идей (голография, УТС, оптич. компьютер).

Лит.: Ландсберг Г. С., Оптика, 5 изд., М., 1976; Вавилов С. И., Микроструктура света, М., 1950; Гердберг В. М., Современная геометрическая оптика, пер. с англ., М., 1962; Вольф И., Вольф Э., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973; Действие излучения большой мощности на металлы, под ред. А. М. Воч-Бруевича, М. А. Ельшивецка, М., 1970; Спектроскопия оптического смещения и корреляция фотонов, под ред. Г. Жакоуза, Э. Найба, пер. с англ., М., 1978; Ахманов С. А., Коротеёв Н. И., Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света, М., 1981; Дивитриев В. Г., Тарасов Л. В., Прикладная нелинейная оптика, М., 1982; Жаров В. И., Летохов В. С., Лазерная

оптико-акустическая спектроскопия, М., 1984; Коварский В. А., Перельман И. Ф., Авербух И. Ш., Микроволновые процессы, М., 1981; Зельдович В. Л., Пилипенко В. Н. Ф., Шкули о В. В., Обращение волнового фронта, М., 1985; Лазерная аналитическая спектроскопия, под ред. В. С. Летохова, М., 1986. А. М. Воч-Бруевич

**ОПТИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД** — рассматривает распространение света в движущихся средах или при наличии движущихся тел. Первые опыты проводились ещё в нач. 18 в. и были связаны с обнаружением *обращения света* от звёздных источников [Дж. Бродли (J. Bradley), 1725]. Последующие исследования привели к открытию *Доплера эффекта* (1842), явления увлечения света движущейся средой (*Физо опыт*, 1851) и доказали отсутствие мирового эфира (*Майкельсона опыт*, 1881). Однозначное объяснение этих явлений с единых физ. позиций стало возможным только после создания частной (специальной) *относительности теории* (А. Эйнштейн, 1905) и последующего применения её принципов к описанию эл.-магн. явлений в равновесии движущихся средах [Г. Минковский (H. Minkowski), 1908]. Оптич. явления во вращающихся системах отсчёта, напр. *Саньяка опыт* (1914), описываются на основе *общей теории относительности* Эйнштейна (1915) с использованием локально инерциальных систем отсчёта.

**Расчётные основы** О. д. с. Такими являются ур-ния *алектродинамики движущихся сред*, записанные для эллектрического  $\mathbf{E}(r, t)$  и магнитного  $\mathbf{H}(r, t)$  векторов плоских монохроматич. волн частоты  $\omega$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(r, t) &= E_0 \exp\{i(\mathbf{k}r - \omega t)\}, \\ \mathbf{H}(r, t) &= H_0 \exp\{i(\mathbf{k}r - \omega t)\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E_0$  и  $H_0$  — комплексные амплитуды этих волн, а  $\mathbf{k}$  — их волновой вектор. Ур-ния Максвелла для таких волн в отсутствие зарядов и токов принимают вид

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= [\mathbf{H}(\mathbf{c}\mathbf{k}/\omega)], \quad \mathbf{B} = \{(\mathbf{c}\mathbf{k}/\omega)\mathbf{E}\}, \\ \mathbf{k}\mathbf{D} &= 0, \quad \mathbf{k}\mathbf{B} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{B}$  — эллектрич. и магн. индукции для волн (1). Материальные ур-ния Минковского в однородной изотропной среде, движущейся с пост. скоростью  $\mathbf{u} = c\mathbf{v}$ , удобно представить в форме

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} + \frac{c\mathbf{v}}{\mu} (\beta^2 \mathbf{E} - \beta(\mathbf{E}\mathbf{E} + \beta\mathbf{B})), \\ \mathbf{H} &= \frac{1}{\mu} \mathbf{B} + \frac{c\mathbf{v}}{\mu} (\beta(\mathbf{B}\mathbf{B}) - \beta^2 \mathbf{B} + \beta\mathbf{E}), \end{aligned} \quad (3)$$

т. к., согласно ур-ням (2), вектор  $\mathbf{B}$  связан с  $\mathbf{E}$ , а вектор  $\mathbf{D}$  — с  $\mathbf{H}$ . Здесь  $\gamma^2 = (1 - \beta^2)^{-1}$ ,  $\mathbf{x} = (\epsilon\mu - 1)$ , а  $\epsilon$  и  $\mu$  — диэлектрич. и магн. проницаемости движущейся среды, измеренные в системе её покоя. Для диспергирующих сред эти величины зависят от частоты  $\omega'$  в системе покоя среды, к-рая в силу эффекта Доплера связана с частотой  $\omega$  и волновым вектором  $\mathbf{k}$  в лаб. системе координат соотношением

$$\omega' = (\omega - \mathbf{k}\mathbf{u})/\sqrt{1 - u^2/c^2} = \gamma(\omega - \mathbf{k}\mathbf{u}). \quad (4)$$

Система ур-ний (2) и (3) для волн (1) имеет отличные от нуля решения в том случае, если

$$\mathbf{k}^2 - \frac{\omega'^2}{c^2} - \frac{(\epsilon\mu - 1)}{c^2} \frac{(\omega - \mathbf{k}\mathbf{u})^2}{1 - u^2/c^2} = 0. \quad (5)$$

Это основное ур-ние О. д. с. — дисперсионное уравнение, связывающее волновой вектор  $\mathbf{k}$  с частотой  $\omega$ , с параметрами среды  $\epsilon$ ,  $\mu$  и со скоростью её движения  $\mathbf{u}$ . Первые два слагаемых в этом ур-нии имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчёта, а последнее слагаемое, согласно (4), содержит величину  $(\omega')^2/c^2$ . В системе покоя среды или при  $\mathbf{u} = 0$  получается известное соотношение:  $\mathbf{k}^2 = \omega'^2 n_0^2(\omega)/c^2$ , где  $n_0^2(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)\mu(\omega)}$  — показатель преломления (показатель скорости для частоты  $\omega$ ). В силу соотношений (3) условия поперечности векторов  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{B}$  в ур-ниях (2) приводят к тому, что в движущейся среде  $E_0$  и  $H_0$  в (1) перпендикулярны вектору  $[\mathbf{k} + \mathbf{u}(\epsilon\mu - 1)(\omega - \mathbf{k}\mathbf{u})\gamma^2 c^2]$ .

**Распространение волн в движущейся среде.** В ур-не (5) кроме оптич. параметров среды  $\epsilon$  и угол  $\theta$  между  $\mathbf{u}$  и направлением распространения волны  $\mathbf{k}$ :  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{u} = kc \cos \theta$ . От этих переменных зависит показатель преломления  $n(\omega, \theta, \beta)$  для волн (1) в движущейся среде, равный  $n(\omega, \theta, \beta) = ck/\omega$  и имеющий, согласно (5), вид

$$n_{1,2}(\omega, \theta, \beta) = \frac{-(\epsilon \mu - 1) \cos \theta \pm \sqrt{(\epsilon \mu - 1) \beta^2 \sin^2 \theta + (\epsilon \mu - 1)^2}}{1 - (\epsilon \mu - 1) \beta^2 \cos^2 \theta} \quad (6)$$

Для решения определяют одну поверхность показателя преломления  $n(\omega, \theta, \beta)$ , поскольку  $n_2(\theta) = -n_1(\pi - \theta)$ , а сама поверхность имеет ось вращения, направленную по скорости перемещения среды  $\mathbf{u}$ . Фазовая скорость волн в движущейся среде  $v_{\text{фаз}} = [c/n(\omega, \theta, \beta)] \times k/k$  (где  $k = |\mathbf{k}|$ ) направлена по волновому вектору  $\mathbf{k}$ , а  $\theta$  и  $\beta$  и  $\mathbf{u}$  зависят только её величина  $v_{\text{фаз}} = c/n(\omega, \theta, \beta)$ . Поверхности этих скоростей являются поверхностью вращения с осью, направленной по  $\mathbf{u}$  (рис. 1). Она как целое смещена из начала координат ввиду по течению

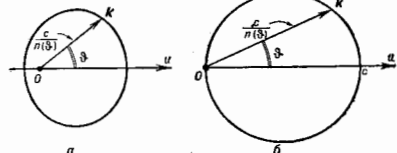


Рис. 1. Поверхности фазовой скорости в движущейся среде ( $\theta$  — угол между направлением волнового вектора  $\mathbf{k}$  и скоростью движения среды  $\mathbf{u}$ ): а — для случая  $u < c/\sqrt{\epsilon \mu}$ ; б — для  $u = c$ .

среды. При  $u = c v_{\text{фаз}}(\theta) = c \cos \theta$ , т. е. поверхность фазовых скоростей становится сферой диаметром  $c$  и с началом координат на поверхности этой сферы. В групповой скорости волн  $v_{\text{гр}} = \partial \omega / \partial k$ , получаемой из (5), имеются компоненты, направленные по  $\mathbf{k}$  и по  $\mathbf{u}$ .

При медленном движении среды, когда  $u/\sqrt{\epsilon \mu} \ll c$ , показатель преломления и фазовая скорость, согласно (6), принимают вид

$$n(\omega, \theta, u) \approx n_0(\omega) - \left\{ \left( \frac{u}{c} n_0(\omega) - 1 \right) + \omega n_0(\omega) \frac{\partial n_0(\omega)}{\partial \omega} \right\} \frac{u}{c} \cos \theta, \quad (7)$$

$$v_{\text{фаз}}(\omega, \theta, u) \approx \frac{c}{n_0(\omega)} + \left\{ \left( 1 - \frac{1}{n_0(\omega)} \right) + \frac{\omega}{n_0(\omega)} \frac{\partial n_0(\omega)}{\partial \omega} \right\} u \cos \theta.$$

Фазовая скорость волн, распространяющихся под острым углом  $\theta$  к направлению движения среды ( $\cos \theta > 0$ ), т. е. «вниз по течению» среды, всегда больше скорости света в покоящейся среде:  $v_{\text{фаз}}(\theta) > c/n_0(\omega)$ . При распространении волн навстречу среде ( $\cos \theta < 0$ )  $v_{\text{фаз}}(\theta) < c/n_0(\omega)$ , ибо движущаяся среда частично «сдвигает» волну. В этом проявляется эффект увеличения света движущей средой. Коэф. увеличения  $\alpha = 1 - 1/n_0$  был рассчитан О. Френелем (А. J. Fresnel) в 1818, а дисперсионная добавка  $(\partial n_0(\omega)/\partial \omega)/n_0(\omega)$ , теоретически рассчитанная Х. Лоренцем (H. A. Lorentz) в 1895, была экспериментально подтверждена в 1905 П. Зеemanом (P. Zeeman).

Существуют диспергирующие среды, в к-рых явление увеличения света движущейся средой отсутствует при любых скоростях. Так, если в системе покоя среды  $e(\omega')\mu(\omega') = [1 + g/(\omega')^2]$ , где  $g$  — постоянная, не зависящая от  $\omega'$ , то дисперсионное ур-ние примет вид  $k^2 - \omega'^2/c^2 - g/c^2 = 0$ . В него не входит скорость движения среды, а следовательно, и нет явления увеличения. В таких средах при малых скоростях их движения коэф.  $\alpha = 1 - 1/n_0'$  в ф-лах (7) в точности компенсиру-

ется дисперсионной добавкой  $(\partial n_0(\omega)/\partial \omega)/n_0(\omega)$ . Распространённый пример таких сред — изотропная холодная электронная плазма, для к-рой  $g = -\omega_p^2 = -4\pi e^2 N/m$ , где  $m$  и  $N$  — масса и концентрация электронов, а  $\omega_p$  — плазменная частота, имеющая одинаковый вид в разл. инерциальных системах. Т. о., движущаяся плазма не увлекает волну (а только влияет на характер её поляризации). Учёт дисперсии в изотропной движущейся среде приводит к тому, что при релятивистских скоростях движения среды ( $\gamma \gg 1$ ), когда частота  $\omega'$  в системе покоя среды становится очень большой вследствие эффекта Доплера (4), оптич. свойства такой среды становятся похожими на свойства электронной плазмы.

**Граничные условия О. д. с.** Простейший пример — задача об отражении ал.-магн. волн от движущегося зеркала, впервые решённая Эйштейном в 1905 методами частой теории относительности. Если волна вида (1) с амплитудой  $E_0$ , волновым вектором  $\mathbf{k}_0$  и частотой  $\omega_0$  падает на движущееся ей навстречу плоское идеально отражающее зеркало со скоростью  $v$ , направленной по нормали к поверхности зеркала, то отражённая от него волна будет иметь другие частоту ( $\omega_1$ ),

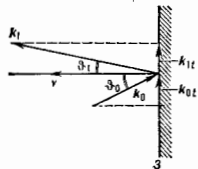


Рис. 2. Схема отражения волн от движущегося зеркала: 3 — зеркало,  $v$  — скорость зеркала.

амплитуду ( $E_1$ ) и волновой вектор ( $\mathbf{k}_1$ ) (рис. 2):

$$\omega_1 = \frac{1 + \beta^2 + 2\beta \cos \theta_0}{1 - \beta^2} \omega_0,$$

$$E_1 = -\frac{\omega_1}{\omega_0} E_0, \quad (8)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{(1 - \beta^2) \sin \theta_0}{1 + \beta^2 + 2\beta \cos \theta_0},$$

где  $\beta = v/c$ ,  $k_0 v = k_0 c \cos \theta_0$ ,  $k_1 v = k_1 c \cos \theta_1$ . Здесь  $\theta_0$  и  $\theta_1$  — углы падения и отражения волн, а векторы  $E_0$  и  $E_1$  перпендикулярны плоскости падения, в к-рой лежат векторы  $\mathbf{k}_0$ ,  $v$  и  $\mathbf{k}_1$ . Ф-ла для  $\omega_1$  в (8) получена с помощью соотношения (4), с заменой  $\omega$  на  $\omega'$  и на  $v$  из условия равенства частот  $\omega'$  и  $\omega$  этих волн в системе покоя зеркала. Связь  $E_1$  с  $E_0$  получена из условия обращения в нуль полного поля  $E$  на зеркале в системе его покоя. При этом было использовано равенство компонент  $k_{0y}$  и  $k_{1y}$  волновых векторов  $\mathbf{k}_0$  и  $\mathbf{k}_1$ , касательных к поверхности зеркала. При попутном движении падающей волны и зеркала во всех формулах следует заменить  $\beta$  на  $-\beta$ .

Ф-лы (8) показывают, что при отражении волн от движущегося навстречу им зеркала частота  $\omega_1$  и величина  $|E_1|$  отражённого сигнала становятся больше, чем соответствующие величины  $\omega_0$  и  $E_0$  для падающей волны, а угол отражения  $\theta_1$  — меньше угла падения  $\theta_0$ . При релятивистских скоростях движения зеркала, когда  $\beta \sim 1$  и  $\gamma \gg 1$ , угол отражения  $\theta_1$  мал ( $\theta_1 \ll 1$ ) при любых  $\theta_0$ . Это значит, что падающая под любым углом  $\theta_0$  волна «отбрасывается» релятивистским зеркалом в направлении его движения. При нормальном падении волны на релятивистское зеркало значительно возрастает частота  $\omega_1 = 4\gamma^2 \omega_0 \gg \omega_0$  и амплитуда  $|E_1| = 4\gamma^2 |E_0| \gg |E_0|$  отражённого сигнала. Таким способом можно преобразовать излучение в более КВ-диапазоны с одноврем. увеличением мощности отражённого сигнала за счёт энергии движения зеркала. В качестве такого зеркала можно использовать пучок релятивистских электронов или плазму, движущуюся навстречу волне, для к-рых в системе покоя  $e(\omega')\mu(\omega') = 1 - \omega_p^2/(\omega')^2$ . В области частот  $\omega' > \omega_p$  такое зерка-

ло начинает пропускать часть падающего на него излучения. В этом случае следует учитывать преломлённую волну частоты  $\omega_0$  (с волновым вектором  $k_0$  и амплитудой  $E_0$ ), проходящую внутрь движущейся среды и уносящую часть энергии. Тогда величина  $E_1$  в Ф-лах (8) будет уменьшена:  $E_1 = -\tau_0 E_0 / \omega_0$ , где  $\tau_0$  — коэф. (комплексный) френелевского отражения,  $|\tau_0| \leq 1$ . С учётом этого частичного пропуска коэф. отражения  $R$  по мощности от релятивистского пучка при нормальном падении примет вид:  $R \approx 10^{-1} \lambda_1^2 / \lambda_0^2$ , где длина волны  $\lambda_0$  падающего излучения измерена в см, а величина плотности тока  $j$  в пучке — в А/см<sup>2</sup>. Электронный пучок с энергией  $W = m_0 c^2 \gamma = 5$  МэВ ( $\gamma = 10$ ) и  $j = 10^8$  А/см<sup>2</sup> преобразует излучение с длиной волны  $\lambda_0 = 1$  см в ИК-излучение с  $\lambda_1 = \lambda_0 / \lambda \gamma^2 = 25$  мкм с эффективностью  $R \approx 10\%$ . Учёт конечной длительности  $\tau_{ФР}$  фронта нарастания тока в пучке приводит к уменьшению величины  $R$  на фактор  $\exp(-16 \tau_{ФР}^2 / \lambda_0^2)$ . Это становится существенным, когда длина волны  $\lambda_1$  отражённого сигнала становится меньше длины  $L_{ФР} = c \tau_{ФР}$  переднего фронта импульса в пучке.

В общем случае скорость  $v$  границы раздела может отличаться от скоростей  $u_{1,2}$  сред по обе стороны от неё, что наблюдается, напр., для ударных волн в потоках газа. Возникает т. в. нормальный разрыв скорости движения сред. На рис. 3 приведены схемы отражения и преломления эл.-магн. волн при их наклонном падении

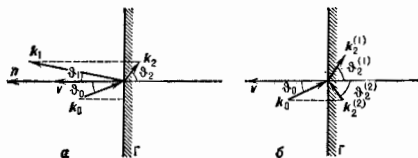


Рис. 3. Схема отражения и преломления волн на нормальном разрыве скорости движения среды: а)  $v < c/\sqrt{\epsilon_{1,2} \mu_{1,2}}$  — досветовое движение границы раздела двух сред; б)  $v > c/\sqrt{\epsilon_{1,2} \mu_{1,2}}$  — сверхсветовое движение границы раздела двух сред; Г — граница раздела, движущаяся со скоростью  $v$  в направлении нормали  $n$ .

на границу, движущуюся со скоростью  $v$  и разделяющую две среды с разл. оптич. характеристиками  $\epsilon_{1,2}$  и  $\mu_{1,2}$  и скоростями движения  $u_{1,2}$ . Для таких ситуаций при решении задач отражения и преломления волн исходят из дисперсионного ур-ния (5) в каждой среде и из условий для волновых векторов, частот и толей рассматриваемых волн на границе раздела, движущейся со скоростью  $v_n = nv$ :

$$k_0 v - \omega_0 = k_1 v - \omega_1 = k_2 v - \omega_2; \quad k_{0t} = k_{1t} = k_{2t}; \quad (9)$$

$$[n(E_{||} - E_1)] = \frac{v_n}{c} (B_{||} - B_1);$$

$$[n(H_{||} - H_1)] = -\frac{v_n}{c} (D_{||} - D_1),$$

где  $n$  — нормаль к границе раздела, а индексами I и II обозначены соответственно полные поля и индукции в среде перед границей раздела и позади неё.

Простейшим примером нормального разрыва скорости может служить волна параметра, бегущая по покоящейся среде с любой скоростью и меняющая её свойства. Такую волну параметра можно создать в нелинейной полойкейсе: среде изменяем (по закону бегущей волны) сильное электрич. поле за счёт Керра эффекта или Показеля эффекта. Бегущая волна сильного электрич. поля может быть создана либо сканированием по этой среде пучка мощного лазерного излучения, либо помещением среды в протяжённый электрич. конденсатор, вдоль к-рого бежит волна напряжения. Скорость этой волны может быть любой. Если скорость фронта бегу-

щего параметра меньше скорости волн в обеих средах, то в среде перед бегущим фронтом имеются падающая и отражённая волны, а позади фронта — одна преломлённая волна. Ф-лы для  $\omega_1$  и  $\theta_1$  имеют вид (8), в к-рых  $\beta = v_n / c \sqrt{\epsilon_{1,2} \mu_{1,2}}$ . Когда скорость  $v_n$  перемещения фронта параметра становится больше скорости волн в обеих средах ( $v_n > c/\sqrt{\epsilon_{1,2} \mu_{1,2}}$ ), то отражённой волны нет, а позади движущейся границы раздела возникает две преломлённые волны. Одна из них — обычная, а вторая распространяется влётку за уходящей границей раздела, но не «догоняет» её.

Если скорости движения сред по обе стороны от плоской поверхности раздела параллельны ей, то такой случай наз. тангенциальным разрывом скорости движения сред и для него  $v_n = 0$ . В этом случае (как следует из приведённых выше Ф-л) отражение волн происходит как на покоящейся границе раздела: частоты всех волн одинаковы, а угол падения равен углу отражения. Однако при таком отражении может происходить поворот плоскости поляризации отражённой и преломлённой волн. Угол поворота пропорц. компонентам скорости движения сред, перпендикулярным плоскости падения. При релятивистских скоростях движения сред для нек-рых углов падения коэф. отражения становятся больше единицы, т. е. происходит усиление отражённой волны за счёт энергии движения сред. Указанные выше особенности распространения волн в движущихся средах и отражении на границах раздела движущихся сред позволяют использовать их для диагностики этих сред или для преобразования частот с одноврем. усилением сигналов.

Лит.: Там м. И. Е., Основы теории электродинам. 10 изд., М., 1989; Ф ра м и Ф у р т, У. И., Ф р е н к е л, А. М., Оптика движущихся сред, М., 1974; Б о т о м, Ю. П., С т о л я р о в С. Н., Современное состояние электродинамич. движущихся сред (безграничные среды), в кн.: Эйнштейновский сборник, 1974, М., 1976; и к и е, Усиление астрономических волн в присутствии движущихся сред, там же, 1977, М., 1980; и к и е, Отражение света от движущегося зеркала и родственные задачи, АФПН, 1988, т. 159, с. 155; С т о л я р о в С. Н., Граничные явления электродинамич. движущихся сред, в кн.: Эйнштейновский сборник, 1975—1976, М., 1978; С и л, С. П.,

**ОПТИКА НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД** — раздел физ. оптики, в к-ром изучаются явления, сопровождающие распространение *оптического излучения* в оптических неоднородных средах, показатели преломления  $n$  в к-рых не постоянны, а зависят от координат. Характер явлений и методы их исследования существенно зависят от характера изменения  $n$  и масштаба неоднородностей по сравнению с длиной волны света  $\lambda$ . Оптич. неоднородности являются поверхностями или объёмами внутри среды, на (в) к-рых меняется  $n$ . Независимо от физ. природы неоднородности она всегда отклонит свет от его первонач. направления. На поверхностях, разделяющих среды с различными  $n$ , происходит *отражение света* и *преломление света*. В среде с непрерывно изменяющимся  $n$ , когда отнесит. изменение  $n$  на расстояниях, сравнимых с  $\lambda$ , очень мало (т. п. градиент  $n$  в  $\lambda$  среде), световой луч, задаваемый величиной  $\text{grad} S = \text{grad} S$  в каждой точке волновой поверхности  $S(x, y, z)$ , меняет направление в зависимости от неоднородности пространства, что приводит к его искривлению (рефракции). Кривизна луча при этом  $\kappa = \text{grad} n - \frac{v_n}{c} \frac{v_n}{c}$ ; и луч загибается в область с большим показателем  $n$ . Этим, в частности, объясняется явление миража (в пустыне поверхность земли очень нагрета, а показатель преломления воздуха зависит от его плотности). Лучи распространяются из пространства предметов в пространство изображений по нескольким разл. путям. Лучи, распространяющиеся под большим углом к горизонту, проходят большой геом. путь, однако часть пути они проходят в области с меньшим  $n$ , поэтому при правильно выбранном  $n$  можно улавливать *оптическую длину пути* и добиться условия фокусировки лучей. В градиентной оптич. среде ур-ние *вэйвковна*, решение к-рого позволяет определять геом. волновые поверхности  $S(x, y, z)$  и

ортогональные к этим поверхностям лучи  $r(x, y, z)$ , имеет вид

$$(\text{grad}S)^2 = n^2(x, y, z).$$

Из этого уравнения получается соотношение для траектории светового луча:

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{dr}{ds} \right) = \text{grad}n(x, y, z). \quad (*)$$

Уравнение (\*) допускает ряд частных решений, удовлетворяющих принципу абсолютного прибора\*, т. е. оптич. системы, дающей стигматическое (резкое, без аберраций) изображение трёхмерного предмета.

Граданы. Простым примером абс. прибора можно считать сферу. *граданы* с распределением показателя преломления по радиусу  $n(r) = n_0 \sqrt{2 - (r/r_0)^2}$  — линза Луневберга и  $n(r) = n_0 / [1 + (r/a)^2]$  — «рыбий глаз» Максвелла. В первом случае неоднородная сфера собирает каждый падающий лучок параллельных лучей в единый фокус, во втором — отображение осуществляется преобразованием инверсии. Для аксиальной симметрии принципу абс. прибора удовлетворяет градан с распределением  $n(z)$ , зависящим от формы сферы. поверхности. Этот градан эквивалентен по аберрациям асферич. линзе. При радиальной симметрии принципу абс. прибора удовлетворяет распределение  $n(r) = \text{sech}(gr)$ . В этом случае неоднородная среда соответствует периодически фокусирующему волноводу с длиной периодичности  $L = 2\pi/g$ , где  $g = R^{-1} \sqrt{2\Delta n/n}$  — постоянная распространения,  $R$  — радиус волновода,  $\Delta n = n_0 - n(R)$  — перепад показателя преломления по сечению волновода. Радиальные граданы в виде цилиндрич. отрезка с таким распределением  $n$  эквивалентны линзе, свободной от аберраций, фазовых и амплитудных искажений. Варьируя длину отрезка, можно менять фокусное расстояние и получать в одном элементе объектив и обрабатывающую систему.

Применение аксиальных и радиальных градунов в фокусирующей оптике с повышенными требованиями к качеству изображения (в объективах фотоаппаратов, микроскопов и др.) позволяет сократить в 2—4 раза или свести к минимуму число оптич. элементов. Граданы используются в качестве фокусирующих элементов лазерных систем видеозаписи. При этом пятно, формируемое и считываемое граданом, имеет размеры порядка длины волны света (0,6 мкм). Блок градунов используется в малогабаритных копируемых аппаратах.

Сельфокки. К числу радиальных градунов, имеющих широкое распространение, относятся безоболочечные световоды, получившие коммерч. название «сельфокки». Они способны самостоятельно формировать и транслировать изображение без дополнит. средств. В них все возбудимые моды имеют равные скорости распространения. В практических реализованных сельфокках на основе кварцевого стекла с параболич. распределением показателя преломления вида  $n(r) = n_0(1 - g^2 r^2/2)$  [что соответствует первым двум членам разложения  $\text{sech}(gr)$ ] в диапазоне 1,26—1,32 мкм, где дисперсия стекла близка к нулю, скорость передачи информации на расстоянии 1 км составляет 13,8 Гбит·см<sup>-1</sup>. Такие сельфокки, состоящие из одного световода, способны передавать изображение как целое с разрешающей способностью 500 лн/мм, с сохранением фазы, плоскости поляризации и малыми потерями (1 Дб/мм). Длина сельфокки достигает 1 км при diam. 100 мкм. Кроме применения для дальней оптич. связи, сельфокки используются как согласующие элементы, элементы жестких волоконно-оптич. трактов, оптич. наконечники волоконно-оптич. фиброгас-троскопов и др. Градиентные поверхности слоев приемят также вместо многослойных интерференционных просветляющих и отражающих покрытий.

Заданный градиент показателя преломления в граданах из стёкол получают под действием потока нейтронов ( $\Delta n = 0,02$ ) либо путём раал. модификаций внешнего об-

мена, когда замена в матрице стёкол одних ионов на другие приводит к изменению её плотности и соответственно  $n$  ( $\Delta n = 0,04$ ). Граданы из полимеров получают в результате обмена мономеров в частично заполимеризов. матрице. Для них достигнуты максимальные  $\Delta n = 0,1$  при diam. 100 м. Возможно также получение градунов при направленном выращивании кристаллов с  $\Delta n = 0,04$  diam. до 20 мм. Кроме конденсатор. сред возможно использование в роли градунов газовых линз, возникающих при ламповом течении газа через равномерно нагретые трубы. Градиентные среды возникают под действием мощного лазерного излучения и приводят к самофокусировке света.

На микро неоднородностях, показател. преломления к-рых отличаются от показателя иреломления окружающей среды, происходит *рассеяние света*. Оптические неоднородностями являются *мутные среды*; в них размеры оптич. неоднородностей обычно превышают длину световой волны  $\lambda$ . Если неоднородность среды вынуждена присутствием в ней мелкодисперсных коллоидных частиц, размеры к-рых соизмеримы с  $\lambda$ , то среда кажется совершенно прозрачной; однако наблюдение под углом  $\approx 90^\circ$  к направлению падающего света обнаруживает светение среды, обусловленное интенсивным рассеянием света (*Тиндаль эффект*). Существенную роль в О. и. с. играет интерференция света между рассеянными, отраженными и преломленными световыми волнами, а также падающей волной.

К неоднородным средам относятся также вещества без иородных включений, в к-рых изменения  $n$  в большом числе микрорегионах, приводящие к рассеянию света, вызваны флуктуациями плотности среды в результате хаотич. теплового движения её молекул или турбулентностью среды. Интенсивность  $I$  света, рассеиваемого непоглощающими диэлектрич. частицами, пропорциональна  $\lambda^{-2}$ , где  $\rho$  — параметр, зависящий от отношения размеров частиц к  $\lambda$ . При рассеянии света на тепловых флуктуациях, размеры к-рых много меньше  $\lambda$ ,  $I \sim \lambda^{-4}$  (Рэлей закон). Для частиц, размеры к-рых много больше  $\lambda$ , параметр  $\rho$  близок к нулю и рассеяние определяется геом. эффектами преломления света на поверхностях раздела объёмов. В этом случае  $I$  не зависит от  $\lambda$ , что и наблюдается при рассеянии света в туманах и облаках — они имеют белый цвет. На изучении рассеяния света неоднородностями в газах, жидкостях и твёрдых телах основаны методы метрометрии и ультрамикроскопии (см. *Ультрамикроскоп*), позволяющие определять концентрацию неоднородностей и изучать их природу (а в метрометрии — и их размеры).

Основой раздел О. и. с. составляет *оптика тонких слоёв*.

Лит.: Борн М., Вольф Э., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973; Маркузе Д., Оптические волноводы, пер. с англ., М., 1974; Магеланд E. W., Gradient index optics, N. Y., 1978; Ильяев В. Г. и др., Оптика градунов, в кн.: Успехи научной фотографии, т. 23, М., 1985.

И. А. Дибенко, Л. Н. Капорский.

**ОПТИКА ТОНКИХ СЛОЕВ** — раздел физ. оптики, в к-ром изучается прохождение света через один или последовательно через несколько непоглощающих слоёв вещества, толщина к-рых соизмерима с длиной световой волны. Специфика О. т. с. заключается в том, что в ней определяющую роль играет *интерференция света* между частично отраженными на верхних и нижних границах слоёв световыми волнами. В результате интерференции происходит усиление или ослабление прошедшего или отражаемого света, причём эффект зависит от носимой *оптической толщины* слоёв разности хода лучей, длины волны (или набора длин волн) света, угла его падения и т. д. Тонкие слои могут быть образованы на массивной подложке из стекла, кварца или др. оптич. среды с помощью термич. испарения вещества и его осаждения на поверхность подложки, хм. осаждения, катодного распыления или хм. реакций материала подложки с выбранным веществом. Для получения таких слоёв используют раал. окислы:  $Al_2O_3$  (1,59),  $SiO_2$  (1,46),

TiO<sub>2</sub> (2,2—2,6); фториды: MgF<sub>2</sub> (1,38), CaF<sub>2</sub> (1,24), LiF (1,35); сульфиды: ZnS (2,35), CdS (2,6); полупроводники Si (3,5), Ge (4,0), а также некоторые другие соединения. (В скобках указаны показатели преломления веществ.)

Одно из важнейших практич. применений О. т. с. — уменьшение отражат. способности поверхностей оптич. деталей (линз, пластин и пр.). Подробно об этом см. в ст. *Промышленные оптики*. Напома многослойные покрытия из большого (13—17 и более) числа чередующихся слоёв с высоким и низким  $n$ , изготовляют зеркала с большим коэф. отражения, обычно в сравнительно узкой спектральной области, но не только в диапазоне видимого света, а и в УФ- и ИК-диапазонах (см. *Зеркала*). Коэф. отражения таких зеркал (50—99,5%) зависит как от длины волны, так и от угла падения излучения. С помощью многослойных покрытий разделяют падающий свет на прошедший и отражённый практически без потерь на поглощение; на этом принципе созданы эфф. светоделители (полупрозрачные зеркала). Системы из чередующихся слоёв с высоким и низким  $n$  используют как интерференционные поляризаторы, отражающие составляющую света, поляризованную перпендикулярно плоскости его падения, и пропускающие параллельно поляризованную составляющую (см. *Поляризация света*, *Поляризационные приборы*). Стенки поляризации в проходящем свете достигает для многослойных поляризаторов 99%. О. т. с. позволила создать лучшие широкого распространения интерференционные *световые фильтры*, полосы пропускания к-рых может быть сделана очень узкой — существующие многослойные световые фильтры выделяют из спектральной области шириной в 500 нм интервалы длины волны 0,1—0,15 нм. Тонкие диэлектрик. слои применяют для защиты металлич. зеркал от коррозии и при исправлении aberrаций линз и зеркал. О. т. с. лежит в основе мн. других оптич. устройств, измерит. приборов и спектральных приборов высокой разрешающей способности. Светочувствит. слои фотокатодов и болометров чаще всего представляют собой тонкослойные покрытия, эффективность к-рых существенно зависит от их оптич. свойств. Оптич. детали с тонкослойным покрытием используются в лазерах и квантовых усилителях света, при создании приборов высокого разрешения (напр., при изготовлении интерферометров Фабри—Перо), при создании дихроичных зеркал, используемых в цветном телевидении, в интерференционной микроскопии (см. *Микроскоп*) и т. д. См. также *Ньютона кольца*, *Полосы равной толщины*, *Полосы равного наклона*.

Лит.: Розенберг Г. В., *Оптика тонкослойных покрытий*, Л., 1958; Крылова Т. Н., *Интерференционные покрытия*, Л., 1973.

**ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ** — свойство нек-рых веществ вращать плоскость поляризации проходящего через них света; частное, наиб. заметное и распространённое проявление гиротропии. Впервые обнаружена в 1811 Д. Ф. Араго (D. F. Arago) в кварце; в 1815 Ж. Б. Био (J. B. Biot) открыл О. а. жидкостей (скипидара), а затем растворов и паров мн. органич. веществ. Он же установил закон вращения плоскости поляризации (см. *Био закон*). Вещества, обладающие естественной О. а., наз. *оптически активными веществами*; их существование О. а. возникает в результате внеш. воздействий, напр. внешнего магн. поля (см. *Фарадея эффект*).

*Вращение плоскости поляризации* обусловлено тем, что две волны с круговой поляризацией — правой и левой — распространяются с разл. скоростями. Поэтому плоскость поляризации линейно поляризов. волны, представленной как сумма двух указанных волн, на выходе из вещества оказывается повернутой на угол  $\varphi$ . Вращение плоскости поляризации зависит от структуры вещества, длины пути света в веществе  $l$  и не зависит от его интенсивности. За меру О. а. вещества (вращающую способность) принимается угол

поворота на единице пути  $\alpha$ . Тогда угол поворота плоскости поляризации в веществе  $\varphi = \alpha l = \pi(n_+ - n_-)l/\lambda$ , где  $n_+$ ,  $n_-$  — показатели преломления для двух круговых волн,  $\lambda$  — длина волны. Для жидкостей и растворов вводят соответственно уд. вращат. способность  $[\alpha]_D = \alpha/c$  ( $c$  — плотность) и уд. вращение  $[\alpha] = \alpha/C$  ( $C$  — концентрация). В отличие от кристаллов для жидкостей уд. вращение обозначается в скобках. Величина  $\alpha$  связана с тензором гирации  $g_{ik}$  (см. *Гиротропия*) и зависит от частоты света, т. е. имеется дисперсия оптич. вращении. Для простого случая изотропной среды  $\alpha = (1/2)\omega^2 g_{33}/c^2$ .

О. а. вещества может определяться как О. а. составляющих его молекул (молекулярная О. а.), так и структурой самого вещества (структурная О. а.).

**Молекулярная О. а.** обнаруживается во всех агрегатных состояниях и растворах. У оптически активных молекул отсутствуют центр и плоскости симметрии (хиральные молекулы). Такая молекула может быть смоделирована двумя взаимодействующими осцилляторами, расположенными взаимно перпендикулярно, расстояние между к-рыми  $\Delta$  сравнимо с  $\lambda$  (т. е. фазы волн в местах осцилляторов различны), а скорость передачи взаимодействия сравнима со скоростью распространения света в среде. Такая система, очевидно, будет по-разному реагировать на правую и левую круговую поляризованную волну, вследствие чего их скорости станут различными. В квантовой электродинамике оптич. вращение рассматривается как двухфотонный процесс рассеяния света на молекуле с поглощением одного фотона и испусканием другого, причём возникает интерференция двух участвующих в процессе фотонных мод. При этом должны учитываться все возможные в молекуле виды взаимодействия электр. и магн. дипольных и квадрупольных моментов, наведённых проходящей световой волной.

О. а. вещества определяется суммой вкладов отд. молекул, к-рая зависит от их расположения и ориентации. При беспорядочном расположении молекул (напр., в жидкости или в газе) эффект дают только хиральные молекулы; к ним относятся энантиоморфные (зеркальные) группы симметрии  $C_n, D_n, T, O$  (см. *Энантиоморфизм*, *Симметрия кристаллов*). В этом случае вращение определяется «спiral вращением»  $R$  (псевдоскалярном):

$$\alpha \sim R = \sum_{i, k} \langle i | \rho | k \rangle \langle k | m | i \rangle, \quad (1)$$

где  $\rho$  — электрический, а  $m$  — магн. дипольные моменты перехода  $i \rightarrow k$  в молекуле, ответственного за О. а. (суммирование производится по всем состояниям молекулы). Из (1) следует, что О. а. имеется только у хиральных молекул, где эти моменты параллельны и оба перехода разрешены.

При упорядоченном расположении хиральных молекул появляются ещё вклад квадрупольных моментов и векторного промавления  $\langle pm \rangle$ ; суммарная О. а. может быть больше. В частности, она сильно возрастает в хиральных структурах; в этом случае вклад в О. а. могут давать и молекулы тех групп, где отсутствует лишь центр симметрии ( $C_2, C_{2v}, D_{2d}, S_4$ ). О. а. может также возникать (индуцироваться) и в симметричных молекулах, к-рые находятся в асимметрии. поле хиральных молекул (напр., растворителя или матрицы).

**Структурная (кристаллическая) О. а.** В кристаллах, где существует дальний порядок, вклад в О. а. помимо хиральных молекул (если таковые имеются) дают коллективные процессы, в основном процессы переноса. Эти процессы могут создавать О. а. в веществе, где отд. частицы не хиральны, при наличии в кристалле необходимых элементов симметрии. В табл. приведены те классы симметрии кристаллов, в к-рых может возникать О. а. молекулярной и структурного происхождения.

## Оптическая активность кристаллов

Класс симметрии	Молекулярная	Структурная
432 (O), 23 (T)	•	—
222 (D <sub>2</sub> )	•	•
622 (D <sub>6</sub> ), 32 (D <sub>3</sub> )	•	•
4 (C <sub>4</sub> ), 4 (C <sub>2</sub> )	•	•
3 (C <sub>3</sub> )	•	•
2 (C <sub>2</sub> )	•	•
422 (D <sub>2d</sub> )	•	•
4 (C <sub>2</sub> )	•	•
222 (D <sub>2</sub> )	•	•
222 (C <sub>3h</sub> )	•	•
3 (C <sub>3</sub> )	•	•
m (C <sub>2</sub> )	•	•
1 (C <sub>1</sub> )	•	•

Примечания: \* — О. а. отлична от нуля, знак минус — О. а. равна нулю.

ладающих хиральной структуры, каждая экситонная зона расщепляется на две — правую и левую, что и создаёт О. а. в области частот экситонных линий поглощения со своеобразным ходом дисперсии вращения, различным для кристаллов из хиральных или симметричных молекул. Сказанное относится и к валентным и ионным кристаллам; в последних особенно существенна деформация ионных группировок солями внутр. полем. В полупроводниковых кристаллах имеется значит. вклад свободных носителей и межзонных переходов. Экспериментально показано, что О. а. может возникать на вакансиях и на дефектных структурах, а также на примесных центрах.

Дисперсия О. а. была замечена ещё Бю, установившим, что  $\alpha \sim \lambda^{-2}$ . Такая (т. н. нормальная) дисперсия наблюдается вдали от области поглощения (напр., кварц имеет в видимой области спектра сильную дисперсию вращения, хотя полоса поглощения у него ок. 180 нм). В области полос поглощения наблюдается сложная зависимость  $\alpha$  от  $\lambda$  (т. н. аномальная дисперсия) и О. а. характеризуется «комплексным вращением»:

$$\Phi = \varphi - i\theta = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} (n_{\perp} - i\kappa_{\perp}) - (n_{\parallel} - i\kappa_{\parallel}),$$

где  $\kappa_{\pm}$  — коэф. поглощения волны с правой и левой круговой поляризацией. Т. к. эти коэффициенты разные, то в области полос поглощения наблюдается *круговый дихроизм*, а свет, поляризованный линейно, превращается в эллиптически поляризованный.

В мощных световых полях может возникать *нелинейная оптическая активность* в результате двухфотонного поглощения, вклада нелинейной поляризуемости, ориентировочного влияния светового поля, в особенности при его круговой поляризации. Последние процессы особенно заметны для макромолекул. Нелинейная О. а. наблюдается.

Очень слабая О. а. ( $\sim 10^{-3}$  рад) может возникнуть у атомных и молекулярных систем вследствие несохранения чётности при слабых взаимодействиях. Эти эффекты обнаружены экспериментально на парах тяжёлых металлов.

О. а. широко используется в молекулярной физике и химии для исследования пространственной структуры молекул, полимеров и биополимеров, надмолекулярных структур, кристаллов, внутри- и межмолекулярных взаимодействий. Разработаны способы исследования оптически неактивных веществ, в к-рых индуцируется О. а.

О. а. измеряется с помощью поляриметров и сахариметров для определённой длины волны; обычно это D-лина Na (a<sub>D</sub>). Дисперсия О. а. измеряется спектрополяриграмми. О. а. можно оценивать по измерениям кругового дихроизма на дихроиграфах, т. к. этот метод обладает большим разрешением. Измерения О. а. более информативны, чем др. методы спектроскопии, они позволяют выявлять и исследовать слабые, запре-

щённые, магн. дипольные и квадрупольные переходы, в обычных спектрах маскируемые более сильными. О. а. необычайно чувствительна к межмолекулярным взаимодействиям и изменениям внеш. параметров, сильно зависит от растворителя и темп-ры (может менять не только величину, но и знак), резко меняется при фазовых переходах, поскольку все эти факторы влияют на симметрию молекулы или относительное расположение молекул.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Агранович В. М., Гитинбург В. Л., Кристаллооптика с учётом пространственной дисперсии и теории экситонов, 2 изд., М., 1979; Кивель В. А., Вурко В. И., Гиротропы кристаллов, М., 1980; Вирвич В. Н. и др., Эффект несохранения чётности в атомном вакууме, «Изв. АН УССР», 1984, т. 87, с. 1775; Кивель В. А., Индуцирование гиротропии как новый метод исследований в физике конденсированных сред, «ФУН», 1985, т. 147, с. 559. Е. А. Рысь.

**ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ** — различие оптич. свойств среды, связанное с зависимостью скорости световой волны от направления распространения и их поляризации. О. а. проявляется в *двойном лучепреломлении, дихроизме, вращении плоскости поляризации*, а также в деполаризации при рассеянии света в среде, в поляризов. люминесценции и т. д. Только в искл. исключительных условиях оптич. изучение определённых поляризации и направлений распространения в оптически анизотропных средах не преобразуется. В прозрачной оптически анизотропной среде световая волна в общем случае представляет собой суперпозицию двух ортогонально поляризов. волн, имеющих разные скорости распространения.

Различают естественную и наведённую О. а. Естеств. О. а. кристаллов обусловлена неодинаковостью по разл. направлениям поля сил, связывающих атомы решётки. Естеств. О. а. веществ, к-рые проявляют её в любом агрегатном состоянии, связана с асимметрией строения отд. молекул таких веществ и обусловленным ею различием во взаимодействиях этих молекул с излучением разл. поляризации, а также особенностями возбуждённых состояний электронов и «ионных остовов» в оптически активных кристаллах.

В макроскопически однородных средах О. а. обусловлена локальной элетрич. анизотропией, т. е. несомпадением в общем случае направления напряжённости элетрич. поля световой волны в данной точке с направлением создаваемых им в этом месте токов (поляризации). Локальная анизотропия вещества проявляется на масштабах, малых по сравнению с длиной волны света.

В рамках этих представлений все характеристики О. а. макроскопически однородной среды определяются комплексным тензором диэлектрич. проницаемости  $\epsilon_{ij}$ , связывающими компоненты гармонич. вектора индукции  $\text{Re}(D^{(e)})_{ij}$  с компонентами гармонич. вектора напряжённости поля  $\text{Re}(E^{(e)})_{ij}$  соотношением  $D_j = \epsilon_{ij} E_j$ , где  $j, l = x, y, z$  — индексы проекций на координатные оси, и по повторяющимся индексам производится суммирование. Как и в изотропной среде, в к-рой  $\epsilon_{ij} = \epsilon(\omega)\delta_{ij}$  и  $\epsilon(\omega)$  — скаляр, а  $\delta_{ij} = 0$  или 1 при  $j \neq i$  и  $j = i$  соответственно, разл. компоненты  $\epsilon_{ij}$  оптически анизотропной среды зависят от частоты  $\omega$  (частотная дисперсия), причём пе обязательно одинаково для разных направлений.

Симметрия тензора  $\epsilon_{ij}$  позволяет классифицировать оптически анизотропные среды. Так, при несущественном поглощении света тензор эрмитов, т. е.  $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}^*$ . Если при этом он веществен, т. е.  $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$ , что отвечает спинаризации поляризации и изаиряженности, то среда, называемая оптически неактивной, в общем случае характеризуется тремя величинами  $\epsilon_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ), к-рые определяют диэлектрич. свойства вдоль трёх ортогональных т. п. диэлектрич. осей. Если же  $\epsilon_k$  различны, то в среде есть два выделенных направления, называемых оптич. осями, вдоль к-рых скорость распространения света не зависит от его поляризации. Такие среды наз. двуосными. Если две из



трёх величин  $\epsilon_{ij}$  одинаковы, то в среде есть одна оптич. ось и среда нап. одноосной. Вообще оптич. ось совпадают с диэлектрическими. Наглядно оптическая анизотропия проявляется в таких средах в виде двулучепреломления.

Оптическая структура среды однозначно определяет О. а., и, как правило, она ниже симметрии тензора  $\epsilon_{ij}$ . Напр., кристаллик NaCl с кубич. решёткой — оптически изотропная среда. Следует отметить, что среду можно считать имеющей высокую оптич. симметрию (напр., кубич. кристалл — оптически изотропной средой) с большой точностью, во всё же с условностью, пока не приняты во внимание эффекты дисперсии, протрастированной, определяемые изменением поля волны на длине порядка постоянной решётки. Эти эффекты тесно связаны с переносом токов в среде, в частности с экситонами.

Если в непоглощающей среде тензор — величина комплексная, что указывает на сдвиг по фазе между напряжённостью и индукцией, то такая среда оптически активная (см. *Гиротропия*). Если при этом вещество часть тензора изотропна, т. е.  $\text{Re} \epsilon_{ij} = \epsilon \delta_{ij}$ , то в ней волны круговых поляризаций распространяются не преобразуясь, а плоскость поляризации линейно поворачивается безотносительно к направлению их распространения. Оптич. активность связана с локальным «кручением» структуры вещества, к-рое характеризуется псевдовектором. В намагниченной среде этот псевдовектор задаётся локальным магн. полем. В немагн. средах оптич. активность есть проявление пространств. дисперсии, причём направление псевдовектора зависит от направления распространения света, а «кручение» определяет псевдовектор, значение к-рого зависит от степени локальной зеркальной диссимметрии среды (молекулы).

Поглощение света в среде описывается антиэрмитовой частью тензора, величинной  $\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^*$ , свойства симметрии к-рой определяют явления дихроизма и плеохроизма — зависимость поглощения света от его поляризации.

Наведённая О. а. может возникать в оптически изотропных средах под внеш. воздействием, меняющим локальную симметрию. Такими воздействиями могут быть механич., электр., магн. поля, мощные потоки излучения (см. *Фотоупругость*, *Керра эффект*, *Фарадей эффект*, *Коттона — Мутона эффект*, *Нелинейная оптическая активность*).

Лит.: Ландау С. Г., Лифшиц 3 изд., М., 1976; Зоммерфельд А., Оптика, пер. с нем., М., 1953; Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Кивель В. А., Буриков В. И., Гиротропия кристаллов, М., 1980.

**ОПТИЧЕСКАЯ ВИСТАВЛЯЕМОСТЬ** — одна из проявлений самовоздействия света в нелинейных системах с обратной связью, при к-ром определённой интенсивности и поляризации падающего излучения соответствует два возможных устойчивых стационарных состояния для прошедшей волны, отличающихся амплитудой и (или) параметрами поляризации. Передающие характеристики таких систем, показывающие зависимость стационарных значений выходной интенсивности  $I_2$ , степени эллиптичности  $\epsilon_2$  и угла наклона  $\Phi_2$  от соответствующих характеристик падающего ( $I_1, \epsilon, \Phi$ ), неоднозначны и обладают ярко выраженными гистерезисными свойствами. При циклич. адиабатич. изменении входной интенсивности или поляризации в широком диапазоне бистабильное устройство функционирует обратимо, причём предыдущее состояние системы однозначно определяет, какое из двух устойчивых состояний при реализуется на выходе.

Именно обратная связь в нелинейных системах является причиной возникновения области значений параметров интенсивности и поляризации падающего излучения, для к-рой передающие характеристики  $I_2(I_1, \epsilon, \Phi)$ ,  $\epsilon_2(I_1, \epsilon, \Phi)$  неоднозначны. В ней фикс-

сиров. значениями  $I_1, \epsilon, \Phi$  соответствует  $m$  стационарных состояний поля прошедшего излучения. Если устойчивых два из них, то в этой области параметров  $I_1, \epsilon, \Phi$  в оптич. системе реализуется О. б., если больше — м у л т и с т а б и л ь н о с т ь. Наряду со стационарными состояниями в нелинейной системе с обратной связью могут возникать режимы устойчивого, периодич., субгармонич. и хаотич. изменения интенсивности и поляризации света.

В качестве оптически бистабильных устройств широко используются: пассивные оптич. резонаторы (ОР), содержащие нелинейные среды, где обратная связь возникает за счёт отражения от зеркала; системы с распределённой обратной связью (встречные волны непрерывно взаимодействуют во мн. сечениях нелинейной среды); оптоэлектронные гибридные системы, в к-рых обратная связь осуществляется за счёт управления параметрами оптич. среды электрич. сигналом с детектора прошедшего светового потока. Представляет интерес б е а р е з о н а т о р н а я О. б., обусловленная корреляциями пар атомов в сильном эл.-магн. поле. Оптич. гистерезис и О. б. возникает также в сложных активных лазерных системах.

Бистабильный *инжекционный лазер* на арсениде галлия был предложен Г. Лашером (G. Lasher) в 1964. Первые эксперименты по оптич. гистерезису и О. б. в газовом лазере с нелинейно поглощающей ячейкой были выполнены В. Н. Лисциным и В. П. Чеботаемым в 1968. Теоретически О. б. в пассивных системах была впервые рассмотрена В. Н. Луговым в 1969 при исследовании распространения света через ОР, в к-ром находилась среда с нелинейностью рамановского типа. В 1975—76 С. Мак-Колл (McColl), Х. Гиббс (H. Gibbs), Чёрчлэй (G. Churchill) и Т. Венкатесан (T. Venkatesan), используя в качестве нелинейной среды пары натрия, впервые экспериментально наблюдали режим О. б. на выходе ОР Фабри — Перо. Гибридные системы впервые были предложены А. А. Кастальским в 1973.

Интерес к устройствам, в к-рых возможна О. б., объясняется в первую очередь возможностью их применения в качестве мпнаторных, низкоэнергетич. оптич. логич. элементов, работающих при комнатной температуре и обладающих субпикосекундным временем переключения.

Амплитудная бистабильность в пассивном кольцевом ОР. Возникновение О. б. удобно пояснить на примере кольцевого ОР, содержащего изотропную нелинейную среду. В такой системе возможна абсорбционная и дисперсионная О. б. Первая возникает, если от интенсивности света зависит коэф. поглощения, вторая — показатель преломления. Рассмотрим дисперсионную О. б. в предположении неизменности поляризации света в ОР, когда длительность падающего импульса  $t_0$  намного больше времени обхода ОР  $t_p$  и времени релаксации нелинейности  $\tau$  ( $t_0 \gg t_p, \tau \gg t_0$ ).

В этом случае изменение медленно меняющейся амплитуды линейно поляризов. волны  $E(t, z)$  в нелинейной непоглощающей среде, помещённой в ОР, описывается ур-нием

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{v} \frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{ik}{n} E. \quad (1)$$

Здесь  $v$  — групповая скорость,  $k$  — волновое число,  $n_0$  — линейный показатель преломления. Зависящая от интенсивности нелинейная добавка  $n_2$  к  $n_0$  удовлетворяет релаксац. ур-нию

$$\tau \frac{dn_2}{dt} + n_2 = \alpha |E|^2, \quad (2)$$

$\alpha$  — константа среды. В кольцевом ОР (рис. 1) линейно поляризованное излучение, проходя через входное зеркало (коэффициент отражения  $r$ ), падает в точку  $z=0$  на нелинейную среду длины  $l$ . Пройдя через неё, оно частично отражается от выходного зеркала (коэффициент отражения  $r$ ), полностью — от двух

других зеркал и снова попадает в среду. Интегрируя (1), (2) и учитывая граничные условия в точке  $z=0$ , можно получить систему ур-ий для поля на входе в среду  $E(t, 0)$  и для величины изменения (набега) фазы  $\bar{\Phi}(t)$  при прохождении светового импульса через ОР:

$$E(t, 0) = (1-r)^{1/2} E_0 + r E(t-t_p, 0) \exp[-t(\Phi_0 + \bar{\Phi})],$$

$$\tau \frac{d\bar{\Phi}}{dt} + \bar{\Phi} = \alpha k l |E(t-t_p, 0)|^2. \quad (3)$$

Здесь  $E_0$  — амплитуда падающей волны,  $\Phi_0 = k(n_0 l + L)$ ,  $l+L$  — полная длина ОР. В стационарном режиме система ур-ий (3) сводится к транспонентному ур-ию для поля в ОР  $(|E|_0^2 = I_{вх}, |E|_0^2 = I_0)$ :

$$(1-r)I_{вх} = I_0[1+r^2-2\cos(\Phi_0 + \alpha k l I_0)], \quad (4)$$

кроме легко решить графически. Для этого представим (4) в виде системы ур-ий для коэф. пропускания  $T_C = (1-r)I_0/I_{вх}$  и полного набега фазы  $\Phi$ :

$$T_C = (1-r)^2(1+r^2-2\cos\Phi)^{-1},$$

$$T_C = (1-r)(\Phi - \Phi_0)/\alpha k l I_{вх}. \quad (5)$$

Первое выражение описывает кривую пропускания (рис. 2, а). Второе выражение в (5) даёт семейство прямых, исходящих из начала координат (для простоты

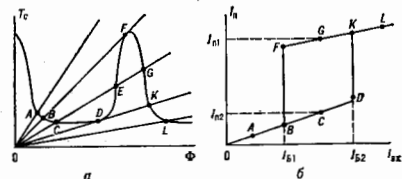


рис. 2. Амплитудная оптическая бистабильность: а — графическое решение уравнений (5); б — зависимость интенсивности света на выходе оптического резонатора от интенсивности линейно-поляризованной накачки.

полагаем  $\Phi_0 = 0$ ), наклон к-рых меняется с изменением интенсивности падающего света. Точки пересечения обоих графиков дают решение ур-ия (4).

При малых и достаточно больших  $I_{вх}$  — единственно (соответственно точки А и L). При интенсивности падающего света, удовлетворяющих неравенству  $I_01 < I_{вх} < I_02$ , в ОР появляются три рабочие точки (С, Е, G). Граничным интенсивностям соответствуют прямые BF( $I_01$ ) и DK( $I_02$ ). Линеаризован (3), можно показать, что если  $\tau \gg I_0$ , то при интенсивностях  $I_01 < I_{вх} < I_02$  из трёх рабочих точек только две, лежащие соответственно на участках BD и FK кривой пропускания (С и G), являются устойчивыми относительно плоскостных возмущений той же поляризации. Рабочие точки, лежащие между D и F на кривой пропускания (напр., Е), оказываются неустойчивыми.

При адiabатич. изменении  $I_{вх}$  меняются показатель преломления нелинейной среды, а следовательно, и опт. длина ОР. Возникание из-за этого фазовая отстройка ОР от нач. состояния приводит к изменению выходной интенсивности. При увеличении входной интенсивности рабочая точка движется до устойчивой части кривой пропускания до точки D ( $I_{вх} = I_02$ ). В ней стационарное решение становится неустойчивым и происходит переход в устойчивую точку К. При дальнейшем увеличении  $I_{вх}$  рабочая точка движется по

устойчивому участку KL кривой пропускания. Уменьшая входную интенсивность, оптич. систему можно вернуть в нач. состоянии (точка А). При этом рабочая точка движется сначала по устойчивой части кривой пропускания LKGF. В точке F ( $I_{вх} = I_01$ ) выходная интенсивность резко уменьшается — система переходит в положение B. Дальнейшее уменьшение  $I_{вх}$  снова связано с движением по устойчивому участку BA кривой пропускания. В результате цикла, изменения входной интенсивности передаточная характеристика  $I_0(I_{вх}) = (1-r)I_0, \epsilon_n = \epsilon, \Phi_n = \Phi$  принимает вид петли гистерезиса (рис. 2, б) и если  $I_{вх}$  лежит между  $I_01$  и  $I_02$ , то интенсивность на выходе может быть либо большой, либо малой в зависимости от того, каким образом изменяется интенсивность (увеличивается или уменьшается). Такое бистабильное поведение лежит в основе двоичных переключающих устройств (см. Оптические компьютеры).

О. б. наблюдается в пассивных ОР с разл. нелинейными средами: атомными парами, изотропными средами, жидкими кристаллами, полупроводниками и т. д. Поляризационная О. б. распространяется интенсивного излучения в среде сопровождается изменением его поляризации. Это происходит даже при распространении вдоль оптич. оси, когда для излучения малой интенсивности поляризация не меняется в отсутствие гиротропии. Для распространяющегося вдоль оптич. оси высокоинтенсивного излучения, поляризованного, напр., в плоскости симметрии, часто возникает поляризация, неустойчивость: малые поперечные добавки к вектору E усиливаются по мере распространения излучения. Такая неустойчивость появляется, в частности, в прозрачной изотропной среде с кубич. нелинейностью, где нелинейная поляризация имеет вид

$$P = A_1 E |E|^2 + A_2 E^*(EE) \quad (6)$$

и малые поперечные добавки к E нарастают в интервале  $A_2 \sin 2\delta > 0$ , где  $\delta$  — разность фаз слабой и сильной компонент поля.

Если такая поляризационно-неустойчивая среда помещена в ОР, то флуктуации поляризации могут нарастать во времени. В стационарном режиме прошедшее через ОР излучение оказывается в одном из двух симметричных состояний, отличающихся знаком угла поворота эллипса поляризации относительно исходного направления и направлением вращения вектора напряжённости поля. Линеинной поляризации падающего на ОР излучения ( $I_{вх}, \epsilon = 0, \Phi = 0$ ) соответствуют два возможных набора устойчивых значений параметров  $I_{01}, \epsilon_{01}$  и  $\Phi_{01}$  ( $t = 1, 2$ ), причём  $\epsilon_{01} = -\epsilon_{02}$  и  $\Phi_{01} = -\Phi_{02}$ . Это соответствует поляризации О. б. Полный анализ О. б. с учётом изменения поляризации излучения весьма громоздок, поскольку он сводится к анализу зависимости интенсивности  $I_0$  и двух параметров поляризации ( $\epsilon_n, \Phi_n$ ) прошедшего излучения от соответствующих характеристик падающего. Однако существует область параметров оптич. системы, при к-рых возможна О. б. или мультистабильность, а также качественно понять, как проявляется О. б., можно из анализа вида бифуркац. поверхности — поверхности в пространстве параметров падающего излучения, на к-рой меняется число стационарных состояний поля в нелинейном ОР. Она определяется из ур-ия

$$D(I_0, \epsilon, \Phi) = 0, \quad (7)$$

где  $D(I, \epsilon, \Phi) = \partial(I, \epsilon, \Phi)/\partial(I_0, \epsilon_{01}, \Phi_{01})$ . Подставляя (4) в (7), можно получить явные выражения для  $I_01$  и  $I_02$  (см. выше). Вопрос об устойчивости стационарных состояний, появляющихся при пересечении бифуркац. поверхности, решается на основе анализа временных ур-ий, аналогичных (3), учитывающих изменение поляризации волны при распространении.

Насколько учёт эффектов поляризац. самовоздействия усложняет передаточные характеристики оптич. бистабильных устройств, видно на примере рас-

пространения плоской монохроматич. волны через кольцевой ОР с изотропной нелинейной средой. В этом случае вместо двух ур-ний системы (3) исходной для численного анализа является система четырех ур-ний для медленно меняющихся амплитуд циркулярно поляризов. волн  $E_{\pm}(t)$  и соответствующих им нелинейных изменений фазы  $\Phi_{\pm}(t)$ . На рис. 3 приведено стационарное решение системы для линейно поляризов.

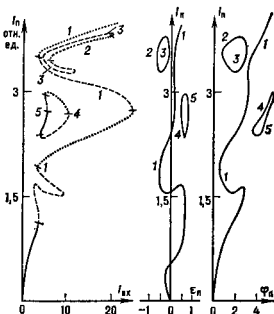


Рис. 3. Передаточные характеристики кольцевого оптического резонатора с нелинейной гиротропной средой при наличии поляризованного самовоздействия: а — зависимость  $I_n(I_{вх})$ ; б —  $E_n(I_{вх})$ ; в —  $\Phi_n(I_{вх})$ . Цифрами помечены различные ветви оптической бистабильности.

волны, падающей на ОР, при определенных параметрах последнего. Для каждого конкретного значения  $I_{вх}$  имеется неск. значений  $I_n$  (рис. 3, а, отд. ветви помечены цифрами), для к-рых на рис. 3 (б) и 3 (в) можно определить соответствующие значения  $E_n$  и  $\Phi_n$ . Области устойчивости показаны только на рис. 3 (а). Здесь сплошной линией изображены решения, устойчивые в двух иррегулярных случаях ( $t_p \ll \tau$  и  $t_p \gg \tau$ ), штрихами — неустойчивые, точками — устойчивые в первом, во неустойчивые во втором.

Устройства с поляризац. О. б., в к-рых кодировка сигнала осуществляется состоянием поляризации света, в ряде случаев имеют преимущества перед амплитудными: в них возможно достижение большего контраста при переключении между устойчивыми состояниями без оптической потери интенсивности волны.

Прожождение светового импульса через нелинейный ОР. Если макс. интенсивность падающего на ОР импульса удовлетворяет неравенству  $I_{01} < I_{макс} < I_{бв}$ , то в процессе распространения его форма и длитель-

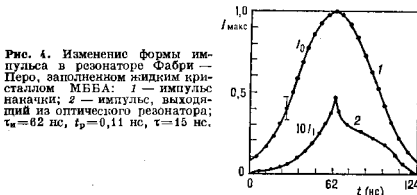


Рис. 4. Изменение формы импульса в резонаторе Фабри — Перо, заполненном жидким кристаллом МБА: 1 — импульсы на входе; 2 — импульсы выходящие из оптического резонатора;  $\tau_n = 62$  нс,  $t_p = 0,11$  нс,  $\tau = 15$  нс.

са в кольцевом ОР с изотропной нелинейной непоглодающей средой в приближении неизменности поляризации света, отличается от (3) лишь тем, что  $E_0$  теперь зависит от времени. Числ. решение этой системы даёт многочисл. примеры изменения формы и длительности светового импульса при прохождении ОР. Наиб. часто эти изменения состоят в компрессии, преобразовании формы (рис. 4), сдвиге вершины импульса, прошедшего ОР, относительно падающего импульса, в появлении нерегулярных осцилляций на временной огибающей. Зависящий от интенсивности поворот эллипса поляризации можно также использовать для формирования импульса заданной формы, т. к. состояние поляризации ( $e_n, \Phi_n$ ) меняется во времени.

Периодические и хаотические режимы при немодулированном входном сигнале. Границы областей устойчивости стационарных состояний поля чувствительны к изменению параметров нелинейной оптич. системы с обратной связью. Если стационарное решение неустойчиво, то в системе могут возникать автоколебания, а при наличии запаздывания ( $t_p \neq 0$ ) и сцинтилл. динамич. режим, при к-ром поле на выходе меняется хаотически во времени. Напр., в кольцевом ОР при  $\gamma = 0,3$ ,  $\Phi = 2\pi p$  и  $ackl = 1$  стационарные решения ур-ния (3)

$$I_c = 1,79 \text{ (при } I_{вх} = 6,7),$$

$$I_c = 2,07 \text{ (при } I_{вх} = 11,6)$$

становятся неустойчивыми при  $t_p = 3,5\tau$ . При этом в первом случае происходит периодическое (рис. 5, а), а во втором случае хаотич. изменение интенсивности поля  $I_n(t) = (1 - r) |E(t)|^2$  в ОР (рис. 5, б).

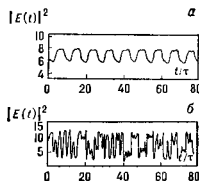


Рис. 5. Режимы периодического и хаотического изменений интенсивности света на выходе кольцевого ОР с нелинейной средой: а — при  $I_{вх} = 6,7, 6$  — при  $I_{вх} = 11,6$ .

В отсутствие поляризац. самовоздействия по мере уменьшения добротности ОР и отношения  $t_p/\tau$  неустойчивыми в определ. области интенсивностей оказываются всё более निकолокальные ветви  $I_n(I_{вх})$ . Поляризац. самовоздействие приводит, с одной стороны, к увеличению числа ветвей пропускания, а с другой — к возникновению автоколебаний, не связанных с конечностью  $t_p$ . При увеличении  $I_{вх}$  или изменении параметров ОР наличие запаздывания ( $t_p \neq 0$ ) приводит к существованию последовательности бифуркаций удвоения периода колебаний  $I_n(t)$ ,  $e_n(t)$  и  $\Phi_n(t)$ . Качество проявлением поляризац. самовоздействия в условиях оптич. хаоса является «обобществление» хаотич. движения, отвечающего разл. ветвям пропускания. При этом область изменения  $I_n(t)$ ,  $e_n(t)$  и  $\Phi_n(t)$  охватывает стационарные состояния, принадлежащие разл. ветвям и оказывающиеся неустойчивыми в результате конечности  $t_p$  или поляризац. самовоздействия.

Другие схемы обратной связи. Наиб. широко распространены оптоэлектронные (гибридные) системы, гл. частью к-рых являются электронич. кристалл и электрич. цепь обратной связи. Величина электрич. поля, прикладываемого к кристаллу, зависит от интенсивности прошедшего света. Ур-ние для амплитуды световой волны, прошедшей гибридную систему, аналогично (3) при  $\gamma = 0$ , поэтому в ней О. б., периодич. и хаотич. режимы изменения выходной интенсивности такие же, как и в кольцевом ОР с нелинейной средой. Гибридная система является плоскостовым, чисто дисперсионным и хорошо управляемым устройством,

к-рое удобно использовать для изучения общих свойств оптической бистабильности.

О. б. возникает также при взаимодействии встречных волн в нелинейных средах, в схеме обращения *ванового фронта*, в гофрках, *вановодах*, при отражении от границы раздела между линейной и нелинейной средой, при взаимодействии встречных волн. Возможна О. б. в холестерич. жидком кристалле в результате светонепродукции. Изменения шага структуры для волн в брэгговском резонансе взаимодействуют, а также в случае, когда обратная связь возникает благодаря межатомам корреляциям.

Применение. О. б. является фантастически оптич. аналогом тех электронных гистерезисных явлений, к-рые используются при создании ЭВМ. Запись элементарной информации может происходить, напр., с помощью нелинейной ОР работающего в бистабильном режиме (рис. 2, б). Так, устойчивые стационарные состояния поля, к-рые соответствуют рабоче точки  $G$  и  $C$  (соответственно интенсивности  $I_{пл}$  и  $I_{сп}$ ), могут считаться нулем и единицей в двоичной системе. Под действием управляющих импульсов возможен переключения между ними. В частности, переход из нижнего устойчивого состояния в верхнее обеспечивается одним импульсом с достаточно большой пиковой интенсивностью, если он распространяется параллельно осн. волне. При этом нач. выходящая интенсивность  $I_{пл}$  сначала возрастает до значения, соответствующего точке  $L$ , а затем уменьшается до  $I_{пл}$ . Оптически бистабильные устройства могут стать базовыми элементами систем *оптической обработки информации*, оптич. логич. и компьютерных систем (см. *Оптические компьютеры, Памяти устройств, Логические схемы*).

Лит.: Луговой В. Н., Нелинейные оптические резонаторы (собственные значения излучения). Обзор, «Квантовая электроника», 1979, т. 6, с. 2053; Ариелли С. М., Оптическая бистабильность, мультистабильность и неустойчивости в жидких кристаллах, «УФН», 1987, т. 153, с. 379; Гибс Х. М., Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света, пер. с англ., М., 1988; Великович А. Л., Дикман М. И., Макарова В. А., Бистабильность, автоколебания, хаос при поливариантных самовозбуждении, автоколебания, хаос при поливариантных самовозбуждении света в резонаторах, «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1989, т. 53, № 6, с. 1088; Розанов Н. Н., Федоров А. В., Ходов Г. В., Эффекты пространственной распределенности в оптической бистабильности и оптическое вычисление, там же, с. 1083; Железев В. И., Поливариантные неустойчивости и мультистабильность в нелинейной оптике, «УФН», 1989, т. 157, с. 683.

**ОПТИЧЕСКАЯ ДЛИНА ПУТИ** между точками  $A$  и  $B$  в прозрачной среде — расстояние, на к-рое свет (оптич. излучение) распространяется в вакууме за то же время, за какое он проходит от  $A$  до  $B$  в среде. Поскольку скорость света в любой среде меньше его скорости в вакууме, О. д. п. всегда больше реально проходимогo расстояния (в предельном случае вакуума равна ему). В оптич. системе, состоящей из  $p$  однородных сред (траектория луча света в такой системе

— ломаная линия), О. д. п. равна сумме  $\sum_{k=1}^p l_k n_k$ , где  $l_k$  — расстояние, пройденное светом в  $k$ -й среде ( $k = 1, 2, \dots$ ),  $n_k$  — показатель преломления этой среды. В среде с плавно меняющимся  $n(l)$  (траектория луча в такой среде — кривая линия) О. д. п. есть

$\int n(l) dl$ , где  $dl$  — бесконечно малый элемент траекто-

рия луча. Понятие «О. д. п.» играет большую роль в оптике, особенно в *геометрической оптике* и *кристаллооптике*, позволяя сопоставлять пути, проходимые светом в средах, в к-рых скорости его распространения различны. Гем. место точек, для к-рых О. д. п., отсчитываемая от одного источника, одинакова, наз. *поверхностью* *световой волны*; световые колебания на этой поверхности находятся в одинаковой фазе. О. д. п. луча света между двумя произвольными точками пространства предметов и пространства изображений наз. *эйкономом*. См. также *Работа зова лучей, Ферма принцип*.

Лит.: Тудоровский А. И., Теория оптических приборов, 2 изд., ч. 1, М.—Л., 1948; Ландсберг Г. С., Оптика, 5 изд., М., 1976; Воронин М., Вольф Э., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973.

**ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ** — процесс записи информации, переносимой оптич. излучением, а также область науки, изучающая эти процессы. О. з. и. осуществляется на т. н. оптич. носителях информации — физ. телах, используемых для сохранения в них или на их поверхности оптич. информации. О. з. и. основана на светонепродукции, процессах в регистрирующей среде, к-рые приводят к изменению состояния или формы носителя. О. з. и. может включать в себя также доп. обработку носителя, напр. проявление, закрепление, изменение размеров и т. д.

Для О. з. и. можно использовать изменение любого физ.-хим. свойства регистрирующей среды (электронного состояния, атомной структуры, намагнитченности и т. д.). Однако в осн. используют изменение двух параметров: комплексного показателя преломления  $\mu = n - ik$  и оптич. длины пути  $l = l_r (l_r$  — геом. путь,  $l$  — показатель преломления среды,  $k$  — характеризует поглощение). Изменение величин  $\Delta k$ ,  $\Delta l$  и  $\Delta l$  под действием оптич. излучения даёт соответственно амплитудную, фазовую и рельефо-фазовую запись. Существует класс региструющей среды (галогенидосеребряные, фотохимические (см. *Фотохимические материалы*), электрооптические, магнитооптические и разл. полупроводники — аморфные, органич., молекулярные. В галогенидосеребряных средах можно получить амплитудную ( $\Delta k \gg \Delta l$ ) или фазовую ( $\Delta l \gg \Delta k$ ) запись. В аморфных полупроводниках фотофиз. реакции приводят к амплитудной записи. В органич. полупроводниках в эл.-фотогр. процессе записи реализуется амплитудная, а в фотомерцательных — рельефо-фазовая записи (см. *Фазовая рельефография*). В магнитооптических средах, меняющих намагнитченность под действием света, О. з. и. её воспроизведение происходит с использованием эффекта Фарадея.

Параметры оптической регистрации. Важнейшими параметрами оптич. регистрирующей среды являются: уд. энергия  $W$  (табл.), характеризующая уд. светочувствительность  $S$  среды ( $W = 1/S$ ) и равная величине входного сигнала, при к-рой достигается заданное отношение сигнал/шум в выходном сигнале (обычно  $W$  измеряется в Дж/см<sup>2</sup>); разрешающая способность  $R$  (в мм<sup>-1</sup>) или плотность записи (бит/см<sup>2</sup>, бит/см<sup>3</sup>); энергия, необходимая для записи одного бита информации, характеризующая информ. светочувствительность  $S_{инф}$  (обычно измеряется в Дж/бит); обратимость записи, характеризующая число циклов перезаписи, возможность записи в реальном времени. Уд. и информ. светочувствительности среды связаны соотношением  $S^{-1}_{инф} = kS^{-1}$ , где  $k$  — коэф., зависящий от способа измерения  $R$ . Светочувствительность сред изменяется в пределах 14 порядков, соответственно,  $W$  от 1 до  $10^{11}$  Дж/см<sup>2</sup>. Энергия записи одного бита информации изменяется от  $10^{-9}$  Дж/бит (типичная величина для прямой записи) до  $10^{16}$  Дж/бит (для наб. чувствительных галогенидосеребряных сред) и до  $5 \cdot 10^{15}$  Дж/бит (для наб. чувствительных несеребряных сред), т. е. она значительно меньше, чем для электронных вычислит. систем ( $10^{12}$ — $10^{19}$  Дж/бит). Ряд сер. разл. классов позволяет выполнять обратную оптич. запись. К таким средам относятся халькогенидные типа  $TeO_2$ , оксиды ванадия  $VO_x$  (число циклов перезаписи не менее  $10^9$ ), гетероструктурные фотомерцательн. среды (число циклов перезаписи не менее  $10^3$ ).

Светонепродукционные процессы в разл. веществах сводятся к трём типам реакции: фотонерон носителя заряда (без изменения структуры вещества); светонепродукт. фазовые переходы (фотоструктурные изменения вещества); селективное электрон-фононное преобразование центров (процессы выжигания провалов в бесфононных линиях).

Фотопереносом электронов обусловлено большинство фотохимических реакций в ионных кристаллах и органич. соединениях, а также процессы фотореакции в эл.-оптич. кристаллах. В халькогенидных стеклообразных полупроводниках фотоперенос заряда является определяющим при интенсивности света  $< 100 \text{ Вт/см}^2$ , а при больших интенсивностях процессы носят фототермич. характер. Световые индуцированные фазовые переходы в большинстве случаев фототермические, поглощённая световая энергия вызывает нагрев вещества. Фототермич. запись наиб. детально изучена в аморфных халькогенидных полупроводниках (теллури, биварные соединения типа  $\text{As}_2\text{S}_{100-x}\text{TeO}_x$ ). В них индуцируемые светом реакции фазовых переходов «аморфное состояние — кристаллич. состояние» по светочувствительности не уступают реакциям фотопереноса (см. табл.). Селективное электрон-фононное преобразование в центрах в твёрдых телах путём лазерного

реакция связана с расходом высокоэнергетич. электронного состояния на неск. низкоэнергетич. состояний или с размножением электронных возбуджений в сильном электрич. поле. Такими процессами являются, напр., фотонное умножение в полупроводниках и распад высокоэнергетич. электронных состояний в щёлочно-галогенидных кристаллах, галогенидосеребряных средах, аморфных и органич. полупроводниках. Величина  $\eta$  и уровень усиления первичной записи определяют предельную светочувствительность сред.

Основные типы носителей оптической информации. Существуют три способа оптич. записи: аналоговый, побитовый, голографический, к-рые используются со всеми типами оптич. носителей информации. Первые исследования по О. з. и. были выполнены Гольдбергом (Goldberg) в 1926 на фотозумлящих в виде микрофотографий. Была достигнута предельная плотность записи информации для димурной записи  $10^8 \text{ бит/см}^2$ . Микрофотография (микрофиши) обладает высокой разрешающей способностью, и информация на них может храниться десятилетиями. Однако этот способ не получил широкого распространения для обработки информации ввиду трудности выборки микрофотогр. информации. Разработкой регистрирующих сред для прямой О. з. и. в реальном времени завершились появлением в 1982 оптич. дисков памяти (см. Памяти устройств), к-рые используются на мировом рынке в видеоприставках и видеоприставках. Высокое качество звуко- и видеосопровождения обеспечило их широкое распространение. В оптич. дисках памяти применяется оптич. побитовая запись в тонких металлах, и полупроводниковых плёнках. Сравнительно простая технология, высокая стоимость носителей и процессов записи (запись одного бита информации в  $\sim 10^8$  раз дешевле, чем магнитная на дисках и лентах), а также надёжность в эксплуатации явились решающими факторами их широкого практич. применения. Они обладают высокой разрешающей способностью (плотность записи  $10^8 \text{ бит/см}^2$ ) и высокой светочувствительностью ( $10^9 \text{ Дж/бит}$ ), позволяющей осуществлять запись с маломощными (5—10 мВт) полупроводниковыми лазерами.

Пространственно-временные модуляторы света обладают высокой светочувствительностью, с ними возможны быстрые запись и стирание, высокая цикличность, они используются для ввода оптич. неогерентных изображений в информац.-вычислит. системы, в оптич. слепеппроцессорах для обнаружения, опознавания образов и слежения, для анализа и преобразования изображений.

О голографич. записи информации см. в ст. Голограммы, Голографическое распознавание образов, Голография.

Лит.: Фризер Х., Фотографическая регистрация информации, пер. с нем., М., 1978; Ву Га в А. А., Захарченко В. П., Чуиловский Ю. А., Фазовый переход металл — полупроводник и его применение, Л., 1979; Акимов И. А., Черкасов Ю. А., Черкашин М. И., Сенсибилизированный фотоэффект, М., 1980; Исчербытые фотофизические процессы, под ред. А. Л. Каргулинского, Л., 1984; Шварц К. К., Физика оптической записи в диэлектриках и полупроводниках, Рига, 1986; Пространственные модуляторы света, М., 1987; Черкасов Ю. А., Ву в о П. А., CdSe-ФТП — новая регистрирующая среда для пространственных модуляторов света широкой области спектра, «Труды ГОИ», 1988, т. 70, в. 204, с. 67 (Июнь, изд. V).

Ю. А. Черкасов.

Параметры регистрирующих сред для оптической записи

Регистрирующие среды	W, Дж/см <sup>2</sup>	S, ед. ГОСТ	R, мм <sup>-1</sup>	S инфр. Дж/бит
Галогенидосеребряные: Polaroid Type 410 Royal X — Pan Kodak	$10^{-11}$ (1—5) · 10 <sup>-10</sup>	10 <sup>4</sup> 10 <sup>8</sup>	10 60	10 <sup>-10</sup> 10 <sup>-12</sup> — 2 · 10 <sup>-16</sup> 10 <sup>-14</sup>
Kodak 649F . . . . .	3 · 10 <sup>-3</sup>	0,01	5 · 10 <sup>3</sup>	10 <sup>-14</sup>
Фотокромные: ионные кристаллы стекла . . . . .	10 <sup>-2</sup> —5	—	—	10 <sup>-4</sup> — 2 · 10 <sup>-10</sup>
Электрокромн. кристаллы: кристаллы LiNbO <sub>3</sub> керамика . . . . .	5 · 10 <sup>-3</sup> 0,1—0,8	—	4 · 10 <sup>3</sup>	3 · 10 <sup>-14</sup>
Аморфные полупроводники	10 <sup>-2</sup> —10 <sup>-4</sup>	—	3 · 10 <sup>3</sup>	10 <sup>-9</sup> 10 <sup>-9</sup>
Магнитоорганические Органич. полупроводники: фототермопластики резолан . . . . .	5 · 10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-2</sup> )	0,1 —	2 · 10 <sup>3</sup> —	5 · 10 <sup>-14</sup> — 10 <sup>-9</sup>
Молекулярные Оптические биестабилизные УО <sub>2</sub>	1 10 <sup>-2</sup>	— —	— —	10 <sup>-9</sup> 10 <sup>-9</sup>
Гетероструктурные: CdSe-термопластик	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>3</sup>	500	3 · 10 <sup>-14</sup> 5 · 10 <sup>-10</sup>

выжигания спектральных провалов на бесфононных линиях реализуется на молекулярных центрах в ионных кристаллах, органич. твёрдых телах и др. Спектры поглощения и люминесценции молекулярных центров в твёрдых телах и замороженных растворах состоят из характерных бесфононных линий (чисто электронные переходы) с широкими фононными крыльями. Если интенсивность бесфононных линий существенно превышает интенсивность фононных крыльев, то с помощью лазера можно сделать спектральный провал «выжечь» узкую бесфононную линию в пределах всего спектра неоднородного ушрения. Лазерное возбуждение переводит центр в метастабильное или ионизов. состояние. Меняя частоту лазера, можно выжигать  $\sim 10^8$  бесфононных линий в пределах полосы фононных крыльев. Этим способом удастся существенно превысить дифракц. предел оптич. записи на двумерных средах ( $10^8 \text{ бит/см}^2$ ), доведи его до  $10^{11} \text{ бит/см}^2$ .

Для световиндуциров. процессов, согласно закону Эйнштейна, один поглощённый квант света вызывает один элементарный акт в веществе. Для количеств. характеристики действия света вводят понятие квантового выхода  $\eta$ , определяемого как отношение ср. количества элементарных актов световиндуциров. процессов или реакций  $N_0$ , возникших под действием  $N$  поглощённых квантов света, к числу этих квантов:  $\eta = N_0/N$ . В прямых световиндуциров. реакциях без доподжит. усиления эффекта, вызванного светом, квантовый выход не может превышать единицу. Он может быть больше единицы (до десятков), если вызванная светом

ОПТИЧЕСКАЯ ЛОКАЦИЯ — обнаружение, определение координат и распознавание разд. объектов с помощью эл.-магн. волн оптич. диапазона. О. л. как самостоят. область науки и техники возникла и определилась с появлением лазеров в нач. 60-х гг.

Малая длина волны излучения оптич. диапазона приводит к различию О. л. от радиолокации. Применение лазеров позволяет формировать узкую диаграмму направленности излучения ( $\sim 10^{-8}$  рад) при относительно небольших диаметрах коллимирующей оптики, что обеспечивает большую точность определения угл. координат объектов, распознавания их фор-

мм и высокую помехозащищённость. Оперативные высокоточные измерения координат объекта — гл. достоинство оптич. локационных систем при сравнительно небольших габаритах, массе и энергопотреблении.

Параметры систем О. л. зависят от характеристик осн. используемых узлов: лазера, фотоприёмника, сканирующего устройства, модулятора и т. д. Наиб. широко в О. л. применяются лазеры, генерирующие в ИК-области спектра — полупроводниковые, твердотельные, газовые. Полупроводниковые лазеры обеспечивают как непрерывный режим (до сотен мВт), так и импульсный (до сотен Вт) в ближней ИК-области спектра ( $\lambda \approx 0,8-0,9$  мкм). Модуляция полупроводниковых лазеров, как правило, осуществляется током накачки. Из твердотельных лазеров в О. л. используются лазеры на разл. матрицах, активированных ионами неодима, в частности на основе алюминотригетового граната ( $\lambda = 1,06$  мкм). Лазер на гранате, обладающий низким порогом возбуждения и хорошей теплопроводностью, может работать при больших частотах повторения импульсов, а также и в непрерывном режиме излучения при кид до 3%. Предпочтительны в О. л. лазеры на двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ -лазеры) с  $\lambda = 10,6$  мкм, имеющие большой кпд ( $\sim 10\%$ ), мощность излучения от единиц Вт до кВт в непрерывном и МВт в импульсном режимах, узкую линию излучения (неск. кГц).

Для поиска лоцируемого объекта и получения его изображения применяются электромеханич. системы сканирования пучка излучения в виде зеркал, оптич. клиньев и т. д.; для быстрого сканирования используются пьезоэлектрич. и вакуумно-электр. дефлекторы с частотой сканирования до единиц кГц.

Прём сигналов в видимой области спектра ( $\lambda = 0,4-0,7$  мкм) обычно осуществляют фотозелеными умножителями, использование их в области  $\lambda > 0,9$  мкм нецелесообразно из-за резкого уменьшения квантовой эффективности фотокатода (<1%). В диапазоне 0,9—3 мкм применяются кремниевые фотодиоды, рп-диоды, лавинные фотодиоды, МОП-диоды (см. *Полевые транзисторы*) с квантовой эффективностью, достигающей 10%. Создание систем О. л. в диапазоне 10 мкм в значит. степени связано с разработкой высокочувствит. и быстродействующих фотодиодов на основе тройных соединений (HgCdTe), работающих при охлаждении жидким азотом (77 К).

В видимой и ближней ИК-области спектра пороговая чувствительность фотоприёмников определяется квантовыми шумами, поэтому, как правило, применяется прямой метод прёма. В дальней ИК-области спектра (10,6 мкм) для повышения пороговой чувствительности приёмников до чувствительности, ограниченной квантовыми шумами сигнала, применяют гетеродинный прём. В этом случае на фотоприёмник одновременно с принимаемым сигналом направляется излучение опорного лазера (гетеродина); в результате взаимодействия возникают колебания комбинац. частот, одна из к-рых (как правило, это разность частот) фильтруется и усиливается. Этот метод прёма реализуется с  $\text{CO}_2$ -лазерами, обладающими высокой стабильностью частоты излучения. При малом отношении сигнал/шум преимущественно обладает гетеродинный метод прёма, однако более точный выбор метода прёма зависит от ряда факторов, связанных с практич. реализацией.

Локация объекта. Осн. задачей О. л., так же как радиолокация, является определение дальности до объекта, к-рое производится путём измерения задержки во времени прихода отражённого сигнала относительно излучающего: дальность  $R$  вычисляется по ф-ле  $R = ct/2$ . Погрешность измерения  $R$  обуславливается ошибками в измерениях временного интервала между обходящим и отражённым импульсами, непостоянством показателя преломления и турбулентностью атмосферы, а также изменением условий отражения излучения от объекта. Разброс величин временного интервала носит статистич. характер из-за наличия случай-

ных помет на входе приёмника наряду с полезным сигналом. Погрешность считывания временного интервала цифровым измерителем можно уменьшить количеством измерений. Флуктуации интенсивности в импульсе вызывают появление случайной ошибки, к-рая ограничивает точность всей системы. При одиночном измерении среднеквадратичная погрешность в определении дальности составляет 5—10 м. В прецизионных импульсных оптич. дальнометрич. системах погрешность может быть снижена до единиц см. Это достигается повышением точности прогноза условий распространения излучения, применением методов статистич. обработки серии измерений, уменьшением длительности импульсов до единиц нс, измерением временного интервала по центру энергии импульса, введением временного стробирования. Дальнейшее уменьшение погрешности измерения дальности до объекта возможно с помощью фазового метода (см. *Обращение волнового фронта, Адаптивная оптика*), к-рый в основном применяется в геодезич. светодальнометрах. В ряде случаев используются углоковые отражатели, позволяющие существенно повысить уровень принимаемого сигнала за счёт высокой направленности отражённого излучения и тем самым увеличить дальность локации.

Обнаружить лоцируемый объект можно непосредственно оптич. локатором, для чего сканируют излучаемым пучком пространство предполагаемого нахождения объекта. Т. к. лазерный пучок имеет малый угол расходимости, то быстрый поиск целей в больших областях пространства затруднён, поэтому оптич. локаторы часто применяются совместно с др. устройствами, осуществляющими быстрый обзор больших областей пространства, обнаружение объектов и наведение на них оптич. осн припередающей оптич. системы локатора. Для целеуказания могут быть использованы радиотехн. средства и пассивные оптико-электронные приборы, оптич. или телевизионные визиры и тепловизионеры.

Для определения угла координат объекта используется либо зависимость амплитуды отбрасываемых прямиых импульсов от разности углов между направлением максимума результирующей диаграммы излучения и направлением прихода излучения, отражённого от объекта, либо зависимость величин принимаемых импульсов от направления прихода излучения с помощью четырёхплощадного координатно-чувствит. фотоприёмника. Напряжения, пропорц. величине отклонения изображения объекта вдоль координат  $x, y$  от оптич. осн, подаются на исполнительные блоки, к-рыми обычно являются электромеханич. устройства (электронно-оптич. вли гидроскопы).

Обработка сигналов, отражённых от подвижных объектов, в общем случае отличается от обработки сигналов, отражённых от неподвижных объектов. Осн. особенностью сигнала, отражённого от движущегося объекта, является изменение несущей частоты по сравнению с частотой излучаемого сигнала — *Доплера эффект*. Практически реализуются оптич. локаторы с импульсными и непрерывными доплеровскими сигналами, если излучаемые и принимаемые световые колебания имеют достаточно высокую степень когерентности, а обработка сигналов производится при гетеродинном прёме.

Примерами систем О. л. могут служить лазерные системы автоматич. сопровождения, определения координат и траекторий ИСЗ, снабжённых угловыми отражателями, системы стыковки космич. аппаратов и т. д. Системы О. л. широко применяются для исследования распределения аэрозолей в атмосфере, формы облаков, скорости ветра. Приборы для этих целей называются *а м и*. Системы О. л. в процессе обзора заданной области пространства дают изображение объекта с большим разрешением, чем радиолокация.

В оптич. локационных системах австракция цифровые вычислит. средства с целью реализации сложных ал-

горитмов статистич. обработки сигнала, распознавания образов, реализации программы адаптации оптич. локац. систем, работающих при существенно изменяющихся условиях эксплуатации, преобразования координат из одной системы в другую.

Сущность недостатков оптич. детекторов — затруднит. использование их в сложных метеорологических условиях (дождь, туман и т. п.) для локации объектов на дальних расстояниях.

Лит.: Лазерные измерительные системы, под ред. Д. П. Зульцова, М., 1984; Морозов И. В. В., Оптико-локационные системы, М., 1984; Малаши и М. С., Каменский и П. Б., Борисов и Ю. В., Основы проектирования лазерных локационных систем, М., 1983; Лебедев Ю. Е. Т., Порфирьев Д. Ф., Хайтун Ф. И., Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-электронных систем, Л., 1984; Лазерная локация, под ред. Н. Д. Устинова, М., 1984.

Ю. В. Попов, В. В. Волонский.

**ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА** — полуфеноменологич. метод описания упругого рассеяния адронных объектов на ядрах. Налетающей на ядро частицей может быть адрон (нуклон, л- или К-мезоны и т. д.), лёгкое ядро (дейтрон,  $\alpha$ -частица) или тяжёлый ион. Исторически О. м. я. возникла как теория, описывающая рассеяние нуклонов на ядрах. Для этого случая она наиб. обоснована теоретически и имеет наилучшее соответствие с экспериментом. Согласно О. м. я., нуклон рассеивается ядром, как потенциальной ямой, описываемой выражением, содержащим мнимую часть, соответствующую поглощению нуклона. Комплексный ядерный потенциал, действующий на нуклон, наз. оптич. потенциалом (ОП). Распространение нуклона в поле с таким потенциалом аналогично прохождению света через полупрозрачную среду с комплексным показателем преломления (отсюда и назв. модели). Действит. часть ОП  $V(r)$  определяет коэф. преломления среды, а мнимая — коэф. поглощения.

О. м. я. предшествовала модель, предложенная в 1935 Э. Ферми (E. Fermi) и Х. Бете (H. A. Bethe) независимо, по к-рой действие ядра на падающую частицу заменялось обычной *потенциальной ямой*. Согласно такой потенциальной модели, сечение рассеяния нуклона на ядре должно плавно зависеть от энергии нуклона  $\mathcal{E}$  и *массового числа ядра А*. Однако в экспериментах по рассеянию медленных нейтронов (с энергиями от неск. кэВ до неск. МэВ) обнаруживались густые и узкие резонансы [что получило объяснение в 1936 в модели *составного ядра* Н. Бора (N. Bohr)]. Впоследствии всё же оказалось, что средние сечения рассеяния можно описывать как потенциальное рассеяние, если добавить к потенциальной яме  $V(r)$  мнимую часть  $iW(r)$ , к-рая учитывает (в среднем) вклад неупругих процессов в упругое рассеяние. Хотя идея о введении в ядерный потенциал мнимой части была выдвинута Бете ещё в 1940, О. м. я. в совр. виде возникла лишь в 50-е гг., когда появились систематич. данные о рассеянии на ядрах нуклонов более высоких энергий с  $\mathcal{E} \geq 10$  МэВ.

В рамках этой модели ОП нуклона содержит также спин-орбитальный член  $V_{SO}(r)\sigma l$  ( $\sigma$  — Паули матрица,  $l$  — операторы орбитального угл. момента). Потенциал, действующий на нуклон, зависит от ориентации его спина  $\sigma$  относительно плоскости рассеяния (угл.  $\theta$ ). В результате спин-орбитального взаимодействия нейтроны, нуклон в процессе рассеяния становятся частично поляризованными (рис. 1).

Т. о., дифференц. сечения рассеяния нуклона на ядре находятся решением *Шрёдингера уравнений*

$$\left\{ -\frac{\hbar^2 \Delta}{2m} + V(r) + iW(r) + V_{SO}(r)\sigma l \right\} \psi(r) = \mathcal{E} \psi(r). \quad (1)$$

Отрицат. значение  $V$  определяется притягательным характером ядерных сил, а положительное  $W$  — условием поглощения нуклона ядром.

Действит. часть ОП обычно выбирают в виде т. н. *потенциала Вуда — Саксона*

$$V(r) = -V_0(N, Z, \mathcal{E})/f(r), \quad (2)$$

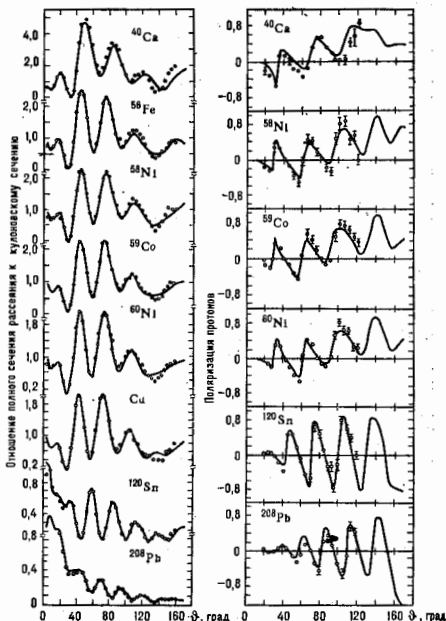


Рис. 1. Дифференциальные сечения рассеяния и поляризации для рассеяния протонов на ядре ядер в зависимости от угла рассеяния  $\theta$  в системе центра масс.

где  $V_0(N, Z, \mathcal{E})$  наз. глубиной ОП,  $f(r)$  определяется выражением

$$f(r) = \{1 + \exp[(r - R)/a]\}^{-1}, \quad R = r_0 A^{1/3}. \quad (3)$$

В ф-лах (2) и (3)  $N$  — число нейтронов,  $Z$  — число протонов в ядре,  $r_0, a$  — параметры О. м. я. В случае протонов ОП содержит также кулоновский потенциал, к-рый обычно берётся в таком же виде, что и в модели оболочек для протонов (см. *Оболочечная модель ядра*). Мнимую часть  $W(r)$  иногда выбирают также пропорциональной  $f(r)$  (объёмное поглощение), но чаще — в поверхностной форме:

$$W(r) = W_0(N, Z, \mathcal{E}) r_0 \delta f/dr.$$

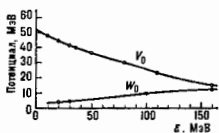
Точное описание эксперим. данных по рассеянию нуклонов на ядрах требует подбора параметров  $r_0, a$  для каждого ядра и для каждой энергии нуклона. Однако приближённо эти параметры можно считать одинаковыми для всех ядер, за исключением самых лёгких, и не зависящими от энергии. Т. н. параметр диффузности  $a$  ( $\approx 0,6$  Фм) близок к соответствующей величине для зарядовой плотности,  $r_0$  ( $\approx 1,25$  Фм) несколько больше, чем соответствующий параметр для плотности нуклонов в ядре, что связано с конечным радиусом ядерных сил. Слабо зависит от числа нуклонов величины  $W_0, V_{SO}$ , а зависимость глубины ОП от  $N$  и  $Z$  аппроксимируется выражением

$$V_0(Z, N, \mathcal{E}) = V_1(\mathcal{E}) + V_2(\mathcal{E})(N - Z)/A.$$

Зависимость от энергии  $\epsilon$  наиб. существенна для членов  $V_0$  и  $W_0$  (рис. 2).

Макроскопич. теория ядра как системы мн. тел позволяет рассчитывать ОП нуклонов. В Хартри —

Рис. 2. Зависимость от энергии нейтронов  $\epsilon$  действительной и мнимой частей оптического потенциала (для случая объемного поглощения).



Фока методе с эфф. силами или в самосогласов. теории конечных ферми-систем ОП выражается через феноменологич. эффективные нуклон-нуклонное взаимодействие (NN-силы). В теории ядерной материи Бете — Бранкера или в вариан. методах ОП вычисляются из первых принципов, исходя из взаимодействия свободных нуклонов. Простейшие диаграммы Фейнмана для ОП изображены на рис. 3 (см. Фейнмана диаграммы).

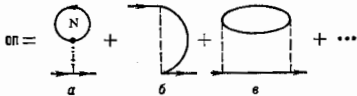
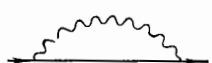


Рис. 3. Простейшие диаграммы для оптического потенциала нуклона; сплошная линия символизирует распространение нуклона ядра, пунктир — нуклон-нуклонное взаимодействие (суммирование по всем нуклонам ядра).

С позиций микроскопич. теории, ср. поле модели оболочек является аналитич. продолжением ОП в область отрицат. энергий  $\epsilon = \mu \approx -8$  МэВ (при этом  $W = 0$ ). Наоборот, О. м. я. можно рассматривать как распространение модели оболочек в континуум. Микроскопич. теория ядра объясняет (качественно) зависимость параметров ОП от энергии нуклона  $\epsilon$ . Так, рост  $W_0$  с ростом  $\epsilon$  связан с увеличением числа неупругих каналов реакции. В модели ядерной материи при малых  $\epsilon$  осн. вклад в  $W_0$  вносит диаграммы типа 3(е), к-рые приводят к зависимости  $W_0 \sim (\epsilon - \mu)^2$ . Более слабая (почти линейная) зависимость  $W_0(\epsilon)$  связана с поверхностным характером поглощения; он же в свою очередь определяется коллективными возбуждениями ядра, большинство которых является поверхностными (рис. 4).

Рис. 4. Диаграмма, приводящая к поверхностному поглощению; волнистая линия символизирует поверхностные возбуждения ядра.



Для нуклонов с энергиями от неск. сотен МэВ до 1 ГэВ ур-ние (1) заменяется аналогичным Дирака уравнением. При таких энергиях О. м. я. даёт ещё лучшее согласование с экспериментом, чем в случае низких энергий.

В случае пионов с энергиями  $\epsilon \leq 100-200$  МэВ ОП описывает одновременно и свойства пионных атомов (см. Адронные атомы). Волновая ф-ция пиона подчиняется релятивистскому Клейна — Гордона уравнению с комплексным ОП  $U^{\pi}$ . Пион-нуклонное рассеяние в основном описывается S- и P-волнами. В соответствии с этим  $U^{\pi}$  содержит два слагаемых  $U^{\pi}_S$  и  $U^{\pi}_P$ ;  $U^{\pi}_S$  определяет собственно ОП, а  $U^{\pi}_P$  приводит к появлению эфф. массы, зависящей от координат и отличной от массы свободного пиона тл. Член  $U^{\pi}_S$  описывается диаграммой, отвечающей приближению малой плотности нуклонов в ядре (газовое приближение, рис. 5). За-

штрихованный квадрат изображает S-волновую часть амплитуды пион-нуклонного рассеяния  $A_S$  (см. Амплитуда рассеяния). Этой диаграмме соответствует аналитическое выражение

$$2m_{\pi}U^{\pi}_S = A^+[\rho^n(r) + \rho^p(r)] + A^-[\rho^n(r) - \rho^p(r)],$$

где  $\rho^n, \rho^p$  — плотности нейтронов и протонов.  $A^+, A^-$  — скалярная и изовекторная компоненты  $A_S$ .

Член  $U^{\pi}_P$  определяется диаграммами (рис. 6), где двойная линия отвечает распространению т. н.  $\Delta$ -изобары (см. Резонансы), заштрихованные треугольники изображают совокупности диаграмм, переводящих нуклонную пару частица-дырка или  $\Delta$ -изобару с нуклонной дыркой в пион. Учёт N- $\Delta$ -взаимодействия приводит к нелинейной зависимости  $U^{\pi}_P$  от  $\rho$ :  $A\rho/(1 + \alpha\rho)$ ,  $\alpha > 0$ .

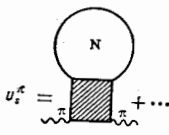


Рис. 5. Основная диаграмма для  $U^{\pi}_S$ .

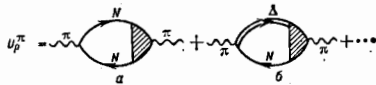


Рис. 6. Диаграммы для  $U^{\pi}_P$ , соответствующие распространению нуклонных частиц — дырки (а) и  $\Delta$ -изобары и нуклонной дырки (б).

Расчёт мнимой части ОП из первых принципов сложен. Поэтому обычно используют модель Бранкера, и к-рой  $\text{Im}U^{\pi}$  выражается через ширину осн. состояния пионного атома дейтерия. На рис. 7 приведены примеры описания рассеяния  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов с энергией  $\epsilon = 80$  МэВ на ядрах  $^{40}\text{Ca}$  и  $^{90}\text{Zr}$ .

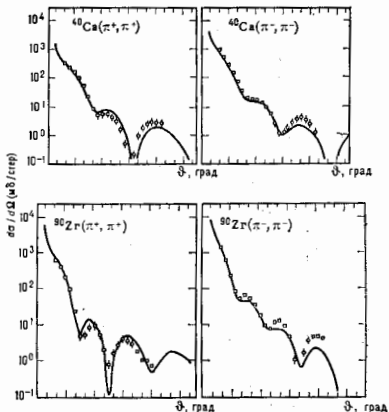


Рис. 7. Дифференциальное сечение  $d\sigma/d\Omega$  упругого рассеяния  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов на ядрах  $^{40}\text{Ca}$  и  $^{90}\text{Zr}$  в зависимости от угла рассеяния  $\theta$ .

Для K-мезонов и антипротонов ОП также могут быть вычислены на основе диаграммы рис. 5. Однако амплитуды KN- и pN-рассеяния известны хуже,



чем  $\pi N$ -амплитуды. На рис. 8 даны примеры рассеяния К-мезонов на ядрах.

Для рассеяния дейтронов и др. ядер, особенно для тяжёлых ионов, О. м. я. находится на феноменологич. уровне, когда теория лишь качественно объясняет форму ОП. О. м. я., описывающая рассеяние тяжёлых

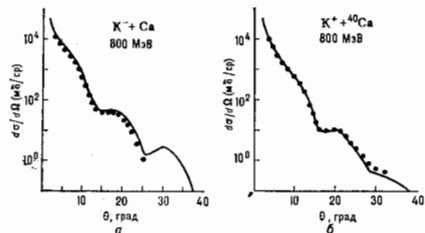


Рис. 8. Дифференциальные сечения  $d\sigma/d\Omega$  упругого рассеяния  $K^+$ - и  $K^-$ -мезонов на ядрах  $^{40}\text{Ca}$  в зависимости от угла рассеяния  $\theta$ .

ядер, отвечает иной физ. картине, чем О. м. я. для нуклонов. Это обусловлено большими угл. моментами  $I$  влетающих ядер. Даже для ионов невысоких энергий ( $E \lesssim 10$  МэВ), лишь незначительно превышающих кулоновский барьер ядра,  $I$  велико:  $I \sim \sqrt{2M\mathcal{E}} r_0 \times (A_1^{1/2} + A_2^{1/2})$ , где  $M = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$  — приведенная масса,  $A_1$  и  $A_2$  — массовые числа ядра-снаряда и ядра-мишени. Поэтому картина рассеяния близка к квазиклассической. При больших прицельных параметрах  $b$  рассеяние обусловлено кулоновским взаимодействием. Режим резко меняется для  $b$ , меньших т. и. радиуса сильного поглощения  $R_n$  (расстояния, отвечающего возникновению контакта двух ядер). Величину  $R_n$  аппроксимируют обычно выражениями  $R_n = 1,5(A_1^{1/2} + A_2^{1/2})$  Фм либо  $R_n = 1,1[(A_1^{1/2} + A_2^{1/2})^2 + 2,5]$  Фм. Для  $b < R_n$  доминирует поглощение. При этом картина рассеяния выглядит как интерференция кулоновского рассеяния и дифракц. рассеяния на чётной сфере. Гл. роль при этом играет величина  $R_n$ , а не детали ОП для расстояний  $r < R_n$ . Для более точного описания рассеяния нужно учитывать частичную прозрачность ядра, т. е. вид ОП в окрестности  $R_n$ .

О. м. я. позволяет высчитать сечение упругого рассеяния разл. адронов и ядер на атомных ядрах в широком диапазоне энергий и массовых чисел, а также определить поляризованное рассеяние нуклонов и её зависимость от угла рассеяния  $\theta$  (рис. 9). С. О. м. я. тесно

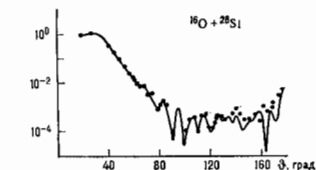


Рис. 9. Дифференциальное сечение упругого рассеяния ионов  $^{16}\text{O}$  и на ядрах  $^{28}\text{Si}$  при энергии ионов  $\mathcal{E} = 34,8$  МэВ в зависимости от угла рассеяния  $\theta$  (в системе центра масс).

Лит.: Бор О., Моттлеттсон Б., Структура атомного ядра, 2-е изд., т. 1, М., 1971; Ватгелс Р. Д., Экотт Э. К., Nuclear scattering and hypernuclei, «Nucl. Phys.», 1982, в. А 374, р. 415; Satchler G. R., Nucleus-nucleus potentials, «Nucl. Phys.», 1983, в. А 408, р. 3; Э. Е. Сперцунин.

**ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА** в квантовой оптике — процесс создания термодинамически неравновесного состояния вещества под воздействием света (см. Накачка).

**ОПТИЧЕСКАЯ ПУТАЦИЯ** — колебательное поведение процессов поглощения и испускания оптич. излучения, обусловленное колебаниями разности населённости уровней энергии вещества при его взаимодействии с сильным резонансным эл.-магн. полем. О. и. — нестационарный эффект, проявляющийся, когда включение взаимодействия вещества с резонансным полем происходит за время, значительно меньшее времён релаксации квантового перехода (см. Двухуровневая система). Физ. природа О. и. заключается в следующем. Пусть в момент времени  $t = 0$  мгновию включается световое поле  $E = E_0 \cos \omega t$ , частота  $\omega$  которого совпадает с частотой  $\omega_{ab}$  разрешённого перехода между уровнями энергии  $a$  и  $b$  частиц вещества (атомов, молекул и т. д.). Под действием излучения разность населённостей этих уровней в отсутствие релаксации осциллирует с частотой Раби  $\Omega = d_{ab} E_0 / \hbar$  ( $d_{ab}$  — матричный элемент дипольного момента), т. е. квантовая система периодически переходит из нижнего состояния в верхнее и обратно. Соответственно чередуются процессы поглощения и испускания излучения. В результате световая волна на выходе из среды оказывается промодулированной по амплитуде с частотой  $\Omega$ .

Термин «путиция» заимствован на теории гирооскопов. Его использование основано на том, что урия для двухуровневой системы, описывающие эволюцию отклика вещества на воздействие резонансного эл.-магн. излучения, в векторном представлении аналогичны урия для симметричного волчка. Согласно этим уриям, вектор Блоха, изображающий мгновенное состояние системы, прецессирует под действием излучения на интервалах времени  $t < T_2$  ( $T_2$  — время поперечной релаксации) вокруг определённого направления с частотой  $\Omega' = \sqrt{(\omega - \omega_{ab})^2 + \Omega^2}$ , что соответствует изменению угла прецессии волчка, т. е. путиции. Путиционное движение вектора Блоха отражает колебательное поведение амплитуды наведённого поля дипольного момента резонансной частицы и разности населённости её уровней энергии.

В оптичке тонких средах эффект О. и. проявляется в виде затухающих колебаний откликающей импульса резонансного излучения на выходе из среды. Причиной путиции в первую очередь являются процессы релаксации, к-рые приводят к уменьшению амплитуды путиционных колебаний отклика резонансных частиц, а следовательно, и к постепенному уменьшению глубины модуляции прошедшей волны. Если линия резонансного перехода уширена неоднородно, то значит, роль играет также т. и. когерентный механизм затухания: путиционные колебания отклика частиц, имеющие разл. значения  $\omega_{ab}$ , происходят с разными частотами, что приводит к затуханию ср. по ансамблю осцилляций разности населённости и амплитуды резонансной поляризации.

Для регистрации эффекта О. и. используются разл. методы: возбуждение резонансного перехода мощными световыми импульсами с длительностью  $t \ll T_2$ ; включение взаимодействия оптич. излучения со средой при помощи настройки частоты перехода в резонанс с излучением лазеров непрерывного действия за счёт старковского сдвига (см. Штарка эффект) спектральной линии в импульсном электрич. поле; быстрое переключение частоты генерации лазеров. Кроме модуляции резонансного излучения эффект О. и. проявляется в виде колебаний фототока, обусловленного фотоионизацией возбуждённых атомов, а также в виде колебаний интенсивности излучения, генерируемого за счёт резонансных параметрич. взаимодействий. Свообразное

связаны др. методы, используемые в теории прямых ядерных реакций. Напр., в методе искажённых волн, применённом для описания неупругого рассеяния частиц на ядрах, искажение падающей и рассеянной волн рассчитывается решением урия Шрёдингера с ОП.

проявление О. в. в оптически плотных средах — эффект самодифракционной прозрачности.

Эффект О. н. является основой ряда методов когерентной лазерной спектроскопии. Его применение в первую очередь связано с возможностью прямых измерений матричных элементов квантовых переходов.

Эффект О. н. наблюдается также и в случае многофотонных переходов — при двухфотонном поглощении (см. *Многофотонное поглощение*) и вынужденном комбинационном рассеянии света.

Лит.: Манькин Э. А., Самаркин В. В. Оптическая спектрокопия, М., 1984; см. также лит. при ст. *Дифракционная система*.

**ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ** — обработка информации с использованием оптич. излучения как носителя информ. сигнала и оптич. элементов для обработки. Достоинства О. о. н. связаны с возможностью быстрой параллельной обработки больших массивов информации. Наиб. характерной особенностью оптич. сигнала как носителя информации является его двумерность. Это свойство оптич. сигнала связано с малой длиной волны света  $\lambda < 1$  мкм. Дело в том, что миз. размеры участка любого изображения, передаваемого с помощью волны, не могут быть меньше  $\lambda$ . В оптич. диапазоне эта величина составляет  $\sim 1$  мкм<sup>2</sup>, что и позволяет передавать по оптич. лучу небольшого сечения ( $\sim 1$  см<sup>2</sup>) большое число (до  $10^8$ ) бит информации параллельно. Т. о., оптич. излучение даёт возможность представлять информацию в форме двумерных картинок, сменяющих друг друга во времени. Для оценки преимуществ такой формы подачи информации сравним её передачу в кино и по телевидению. В кино информация подается с помощью медленно движущейся киноленты со скоростью 24 кадра в секунду с большим объемом информации в каждом кадре. В телевидении информация передается по радиоканалу, последовательно точка за точкой. Скорость передачи информации  $\sim 6$  МГц, т. е. в 250 тысяч раз быстрее, чем в кино. Но качество изображения на киноэкране значительно выше, чем на экране телевизионного. Т. о., даже медленная параллельная подача информации может иметь преимущества перед быстрой последоват. подачей.

Ввод информации в световой луч осуществляется с помощью транспаранта или пространств. модуляторов света. Оптич. луч, модулированный в каждой точке своего поперечного сечения, позволяет обрабатывать параллельно сразу большой массив данных, представленный в форме двумерной оптич. картинки. Оптич. устройства дают возможность очень просто и быстро реализовать ряд важных интегральных операций над двумерными сигналами, таких как преобразование Фурье, Гильберта и Лапласа, нахождение свертки и корреляции двух ф-ций и нек-рые др. Так, обычная оптич. линза позволяет мгновенно получить фурье-спектр оптич. изображения, падающего на эту линзу. Вводя соответствующие фильтры в фокальную плоскость после линзы, можно значительно улучшить качество оптич. изображения или даже увидеть изображение невидимого фазового объекта.

Одной из важнейших проблем, решаемых при О. о. н., является задача распознавания обра-

ботки после прохождения линзы световая волна становится плоской и освещает транспарант в плоскости  $P_1$ . Фронт световой волны искажается транспарантом. В плоскости  $P_2$  помещается транспарант, являющийся согласованным фильтром для искомого двумерной картинки. Он обладает тем свойством, что компенсирует искажения волнового фронта, если падающая на него волна является двумерным фурье-спектром от искомого картинка. Если в плоскости  $P_1$  находится искомого картинка, то согласованный с ней фильтр точно компенсирует кривизну падающей на него волны. После, прошедшее транспарант в плоскости  $P_2$ , оказывается квазиплоской волной и собирается линзой  $L_2$  в небольшое яркое светящееся пятно в плоскости  $P_3$ . Если в  $P_1$  помещена к-л. другая двумерная картинка, не искомого, то компенсации фазовых искажений в плоскости  $P_2$  не происходит, волна после  $P_2$  не является квазиплоской и линза  $L_2$  разбрасывает свет по всей плоскости  $P_3$ . Т. о., описанный процессор позволяет по появлению яркого пятна в центре  $P_3$  определить, когда в плоскости  $P_1$  находится искомого образ. Имея набор согласов. фильтров, легко определить, какой из известных сигналов подан на вход оптич. процессора. Подобные процессоры весьма успешно использовались для распознавания букв или даже целых слов в читающих текст машинах.

Разработаны спец. оптич. схемы, позволяющие получить фильтр, согласованный с любой заранее известной двумерной картинкой. Схемы, подобные изображенной на рис., позволяют с большой скоростью, ограничиваемой только скоростью ввода информации в плоскости  $P_1$  и  $P_2$  и скоростью вывода информации из плоскости  $P_3$ , решать задачи О. о. н. Трудности О. о. н. связаны с необходимостью быстрого ввода и вывода информации в оптич. процессор, а также недостаточной точностью обработки данных, введенных в виде аналоговых сигналов в плоскости  $P_1$  и  $P_2$ . Последняя трудность устраняется при переходе к цифровым оптич. сигналам. Лит.: Престон А. К. Когерентные оптические вычислительные машины, пер. с англ., М., 1974; Парыги В. Н., Валашихин В. И., Оптическая обработка информации, М., 1987.

**ОПТИЧЕСКАЯ ОРИЕНТАЦИЯ** в полупроводн. о. в. Si и Ga — возникновение преимуществ. направления спинов генерированных носителей зарядов и взаимодействующих с ними ядерных спинов при освещении полупроводника циркулярно поляризов. светом. При правой поляризации спины ориентируются противоположно световому лучу, при левой — вдоль него. О. о. впервые обнаружена Ж. Лампелем (J. Lampel, 1968), теория создана В. И. Перелом и М. И. Дьяконовым (1974). О. о. обусловлена передачей угл. момента циркулярно поляризов. фотонов носителям заряда и ядрам. Спиновая ориентация носителей возникает в результате спин-орбитального взаимодействия. Ядерные спины ориентируются за счёт сверхтонкого взаимодействия о фотовозбужденных ориентиров. электронах (см. *Овергаузера эффект*). Кристаллич. анизотропия и коллективный характер взаимодействия электронных

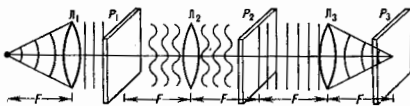


Схема оптического процессора.

з о в. Если надо из набора произвольных двумерных картинок выбрать одну определенную, то для этого весь набор картинок (транспарантов) последовательно вводится в плоскость  $P_1$  оптич. процессора (рис.). Точечный источник  $L$  расположен в фокусе линзы  $L_1$ ,



Рис. 1. Схема оптических переходов под действием правополяризованного циркулярно поляризованного ( $\sigma^+$ ) света в кристаллах  $A^{III}V^V$ ; указаны проекции спина на ось  $z$ .  $E_1, E_2, E_3, E_4$

и ядерных спинов определяют существенное отличие О. о. в полупроводниках от оптической ориентации парамат. атомов газа.

Наиб. полно исследована О. о. спинов в Si и соединениях группы  $A^{III}V^V$ . На рис. 1 показана схема уровней

у два зоны проводимости ( $\mathcal{E}_c$ ) и потолка валентных подзон ( $\mathcal{E}_{v1}, \mathcal{E}_{v2}$ ) для кристаллов  $A^{III}B^V$ . Зоны  $\mathcal{E}_c$  и  $\mathcal{E}_{v2}$  образуют вырожденные  $s$ - и  $p$ -атомными состояниями,  $k$ -р-м соответствующим величинам спина  $S = 1/2, S = 3/2$  и  $S = 1/2$  (в единицах  $\hbar$ ). Каждый подуровень характеризуется проекцией спина на ось квантования, в качестве  $k$ -рой выбирается направление светового луча (ось  $z$ , рис. 2).

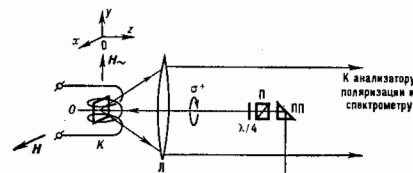


Рис. 2. Схема эксперимента по наблюдению оптической ориентации спинов методом поляризованной люминесценции;  $O$  — образец,  $K$  — линза, создающая переменное магнитное поле  $H_0$  для наблюдения резонансов,  $\lambda/4$  — четверть-волновая фазовая пластинка,  $\Pi$  — поляризатор,  $\Pi\Pi$  — поворотная призма.

Отношение интенсивностей переходов  $-3/2 \rightarrow -1/2$  и  $-1/2 \rightarrow 1/2$ , проходящих при поглощении правополяризованных ( $\sigma^+$ ) фотонов с энергией  $\hbar\omega$ , удовлетворяющее условию  $\mathcal{E}_g < \hbar\omega < \mathcal{E}_g + \Delta$  ( $\mathcal{E}_g$  — ширина запрещенной зоны,  $\Delta$  — величина спин-орбитального расщепления валентной зоны), в соответствии с правилами отбора составляет 3:1. Это приводит к стени ориентации ( $P$ ) электронов при их рождении, равной  $P = (N_{-1/2} - N_{+1/2}) / (N_{-1/2} + N_{+1/2}) = 50\%$ . Здесь  $N_{\pm 1/2}$  — заселенности спиновых состояний в зоне проводимости. Средний по ансамблю спин электронов  $\langle S \rangle = 0,5P = 0,25$ . При увеличении энергии фотона до значений  $\hbar\omega > \mathcal{E}_g + \Delta$  включают переходы из оптенной валентной подзоны  $\mathcal{E}_{v2}$ ,  $k$ -рые уменьшают разность заселенностей состояний зоны проводимости с  $S = \pm 1/2$  и величину  $P$ . Зависимость  $P(\omega)$  позволяет определить параметр  $\Delta$ .

Трудность наблюдения  $O. o.$  в твердом теле заключается в её быстрой релаксации. Характерные времена спиновой релаксации для электронов  $\tau_s^0 \sim 10^{-7} - 10^{-10}$  с, а для дырок  $\tau_h^0 \sim 10^{-10} - 10^{-13}$  с (это во много порядков меньше времён спиновой релаксации свободных атомов в газах). Спиновая система ядер релаксирует медленно:  $\tau_n^0 \sim 10^{-2} - 1$  с в кристаллах  $A^{III}B^V$  и  $\tau_n^0 \sim 10^2 - 10^4$  с в Si.

Методы обнаружения  $O. o.$  в полупроводниках базируются либо на возможности наблюдения ориентиров, носителей за времена, меньшие  $\tau_s^0$  (метод поляризованной люминесценции), либо на наблюдении равновесной ядерной намагниченности (см. ниже), сохраняющейся длит. время (метод ядерного магнитного резонанса) и квантовой магнетометрии, использующей скинции. Развит также метод, основанный на циркулярном фотогальваническом эффекте, в  $k$ -ром  $O. o.$  спинов приводит к появлению тока.

Метод поляризованной люминесценции основан на измерении степени ( $\rho$ ) циркулярной поляризации рекомбинационного излучения (люминесценции) с участием ориентированных носителей. При наблюдении люминесценции вдоль возбуждающего луча  $\rho = \langle S \rangle$ . Если время жизни фотовозбужденного неравновесного состояния  $\tau \leq \tau_s^0$ , то наблюдение значит. величина  $\rho = (n_+ - n_-) / (n_+ + n_-)$ , где  $n_{\pm}$  — числа фотонов рекомбинац. излучения, поляризованных по правому и левому

круту. При наблюдении люминесценции кристаллов  $A^{III}B^V$  в направлении возбуждающего луча света  $\rho_0 = 0,25\tau_s^0 / (\tau + \tau_s^0)$ ; из-за быстрой релаксации вклад поляризации дырок пренебрежимо мал.

Наложение поперечного магн. поля (напр., вдоль оси  $ox$ ) приводит к лямаровой прецессии спина и уменьшению  $\rho$  в дополнение к его понижению вследствие рекомбинации ориентиров, электронов и их спиновой релаксации. Вращение  $S$  в поперечном магн. поле  $H$  приводит к уменьшению  $\rho$  по закону

$$\rho = \rho_0 [1 + (\omega T_s)^2]^{-1/2}$$

где

$$T_s^{-1} = \tau^{-1} + \left(\frac{g}{g_s}\right)^{-1}, \quad \omega = \mu_B g H / \hbar$$

( $g$  — фактор спектроскопии, расщепления в магн. поле,  $\mu_B$  — магнетон Бора). По внеш. проявлению электронный эффект магн. деполаризации люминесценции аналогичен Хамле эффекту. Осн. информация об  $O. o.$  в кристаллах  $A^{III}B^V$  получена с помощью поляризов. люминесценции (рис. 2).

Методы ЯМР и квантовой магнетометрии. Большие времена спиновой релаксации ядер  $\tau_n^0$  позволяют «вакопить» в освещаемом полупроводнике ядерную поляризацию, на неск. порядков превышающую её термодинамически равновесное значение. Процессы  $O. o.$  электронных спинов и наблюдение её результатов разделены во времени. Созданную путём освещения в слабом магн. поле ядерную поляризацию измеряют с помощью ЯМР-спектрометра или скинда. Этот метод эффективен для чистого Si, в  $k$ -ром наблюдение поляризации люминесценции при  $O. o.$  затруднено из-за соотношения  $\tau \gg \tau_s^0$ . Отказ от регистрации люминесценции позволяет использовать неяркие оптич. переходы с малыми квантовым выходом и коэф. поглощения. Это обеспечивает поляризацию ядерных спинов в объёме образца.

Фотогальванический метод основан на эффекте асимметричного рассеяния ориентированных по спину электронов относительно плоскости, содержащей их спин и импульс  $p$ . Эде возникает за счёт асимметричного рассеяния. Изменяется внеш. магн. поля, «разворачивающего» вектор ( $S$ ) относительно импульса  $p$  элекрона, позволяет варьировать и наблюдать фототок, пропорц.  $\langle \sigma \rangle p$ , обусловленный  $O. o.$

Применение. Методом  $O. o.$  в полупроводнике исследуются кинетич. и релаксаци. явления, параметры зонной структуры, дефекты кристаллич. структуры. Деполаризация рекомбинц. излучения в магн. поле, наблюдаемая в  $A^{III}B^V$ , даёт информацию о механизмах рекомбинации и спиновой релаксации носителей. Для полупроводников характерны спенифич. типы спиновой релаксации: при низких темп-рах существенны обмен спином с быстро релаксирующей дыркой (механизм Бира — Аронова — Пикуса), при комнатной темп-ре — механизм Дьяконова — Переля, обусловленный сжатием спинового вырождения зон в кристаллах без центра инверсии.

Спиновая «метка» фотовозбужденных электронов, двигающихся через области переменного состава в вариозных полупроводниках и полупроводниковых структурах, позволяет изучать диффузию и подвижность неравновесных носителей, исследовать процессы реуализации. Параметры зонной структуры исследуются по зависимости степени поляризации люминесценции или эмитируемых в вакуум электронов от энергии квантов возбуждающего света.

$O. o.$  электронов в кристаллах используется для получения интенсивных поляризов. пучков свободных электронов, т. к. при спец. обработке поверхности кристаллов в высоком вакууме удаётся достичь отрицат. электронного тоста и обеспечить высокий квантовый выход фотоелектронной эмиссии.

О. о. ядерных спинов. Наиб. эффективно ядерная поляризация осуществляется за счёт сверхтонкого взаимодействия электронов, локализованных на донорной примеси, причём для мелких уровней электроны взаимодействуют с большим числом ядер (напр.,  $10^8$  для GaAs). При этом действующее на электрон ср. суммарное поле всех ядер ( $H_N$ ), находящихся в области локализации этого электрона, даже при незначит. степени поляризации ядер ( $P_N$ ) может быть большим (в GaAs  $H_N$  достигает десятков кЭ). Одновременно на каждое ядро со стороны ориентиров. электронов действует флуктуирующее во времени (из-за рекомбинации и спиновой релаксации) поле электронов, ср. величина к-рого  $H_e$  пропорц.  $\langle S \rangle$ , и при полной поляризации электронов ( $\langle S \rangle = 1/2$ ) измеряется десятками Э. В результате в электронно-ядерной спин-системе в условиях О. о. действует внутр. обратная связь, т. к. величина  $\langle S \rangle$  определяется суммарным полем  $H_N + H$  ( $H$  — внеш. поле), а величина  $H_N$  в свою очередь зависит от  $\langle S \rangle$  (рис. 3, а).

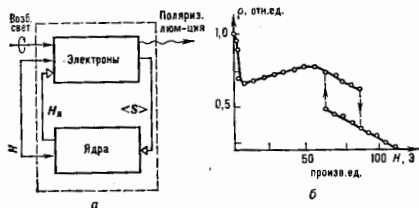
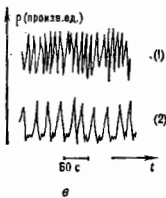


Рис. 3. Нелинейность поляризации электронно-ядерной спин-системы (ЭЯСС) полупроводника в условиях оптической ориентации: а — схема внутренней обратной связи в ЭЯСС; б — бистабильность поляризации ЭЯСС кристалла  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$  при  $T=77$  К и угле  $\phi=3^\circ$  между  $H$  и осью (110) кристалла, возбуждаемое светом вдоль оси (100); а — неустойчивость поляризации ЭЯСС при  $\phi=6^\circ$  (1) и  $\phi=9,5^\circ$  (2).



Поведение электронно-ядерной спин-системы в условиях О. о. описывается системой связанных нелинейных ур-ний. При определенной пространственной структуре поля  $H_N$  есть области решений, где поляризация электронов и ядер бистабильна (рис. 3, б), а также решение, к-рое неустойчиво, что соответствует возникновению незатухающих колебаний (рис. 3, в). Бистабильность и неустойчивость поляризации люминесценции наблюдались при О. о. в твёрдых растворах  $Al_xGa_{1-x}As$ , в к-рых существенную роль играет локальное нарушение кубич. симметрии, вызванное частичным замещением атомов Ga на Al. Период незатухающих колебаний  $\rho$  в зависимости от внеш. условий изменялся в диапазоне 10—50 с. Нелинейные эффекты — следствие коллективного характера электронно-ядерных взаимодействий при О. о. Они наблюдались в диапазоне  $H \sim 0,1-1000$  Э.

Оптическое охлаждение ядерной спин-системы (ЯСС). Энергетич. состояние ЯСС характеризуется спиновой темп-рой  $\theta$ , которая определяется спин-спиновым взаимодействием ядер. Это взаимодействие значительно сильнее спин-решётчного, характеризующего обмен энергией между ЯСС и решёткой, что обеспечивает возможность достижения значений  $\theta$ , на неск. порядков меньше темп-ры решётки  $T$ . Изменение ориентации ядер, вызванное взаимодействием с оптически ориентиров. электронами, сопровождается изменением ядер-

ных ядерных спинов в их локальном поле  $H_N$ , совданном на данном ядре всеми остальными ядрами. Согласно теории:

$$\theta^{-1} = 4I\mu(S)/\mu(H^2 + H_N^2),$$

где  $I$  и  $\mu$  — спин и магн. момент ядра. Мерой  $\theta$  в поле  $H$  служит ср. спин ядер:

$$\langle I \rangle = 1/2(\mu + 1)\mu\theta^{-1}H$$

( $H_N$  пропорц.  $\langle I \rangle$ ). После выключения поля  $H$  поляризация ядер исчезает ( $\langle I \rangle \rightarrow 0$ ) и величина  $\theta$  не может быть измерена непосредственно. Однако, т. к. спи-решёточная связь мала, состояние с уменьшенной величиной  $\theta$ , соответствующее уменьшению числа возможных спиновых конфигураций, сохранится в течение длит. времени  $T_d$ . Если включить через время  $t < T_d$  измерительное поле  $H_{изм} \perp S$ , то поляризация ядер вдоль  $H_{изм}$  вызывает деполаризацию люминесценции в течение времени релаксации ЯСС.

При оптич. охлаждении ЯСС в кристаллах  $Al^{100}Bu$  достигают  $\theta \sim 1-5 \cdot 10^{-10}$  К, а для магнитоработальной системы ядер  $^{29}Si$  (4%) в кремнии получены  $\theta \sim 10^{-4} - 10^{-6}$  К.

Оптич. охлаждение ядер возможно также и в поле ориентиров. электронов  $H_e$ , если  $H = 0$  или  $H \perp S$ . В последнем случае поляризация ядер вдоль  $H$  может усиливаться или ослаблять деполаризирующее действие  $H$  в зависимости от взаимной ориентации  $H$  и  $H_N$ . На рис. 4 показана кривая  $\rho(H)$  для кристалла  $AlGaAs$ , в

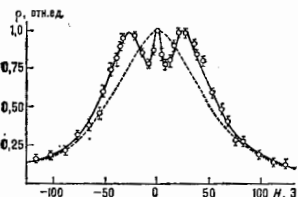


Рис. 4. Магнитная деполаризация люминесценции кристалла  $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$  при  $T=77$  К и  $\phi=45^\circ$ ; при  $H=H_N$   $\rho(H)=\rho(0)$ .

к-ром  $H_N \uparrow H$ . При  $H = H_N$  действие поля компенсируется и величина  $\rho(H)$  восстанавливается до значения  $\rho(0)$ . Пунктир — зависимость  $\rho(H)$  для электронов при  $H_N = 0$ . Действие света имеет следствием охлаждение ЯСС, а поляризация ядер возникает в результате установления термодинамич. равновесия во внеш. поле в условиях низкой спиновой темп-ры.

Оптическое детектирование парамагнитного резонанса. В условиях накопления поляризации ядер на электронные спины кроме внеш. поля действует эффективное поле ядер  $H_N$ , что влияет на вид зависимостей  $\rho(H)$  и позволяет оптически детектировать ЯМР в малых объёмах ( $\sim 10^{-7}$  см<sup>3</sup>) при поглощении света в приповерхностном слое с толщиной меньше 1 мкм. Значит, поляризация ядер, к-рая может быть получена в условиях оптич. охлаждения их спин-системы, позволяет обнаружить ЯМР в слабых внутр. магн. полях. Уменьшение  $H_N$  в результате деполаризации ядер в условиях резонанса приводит к изменению поляризации люминесценции, что и делает возможным оптич. детектирование ЯМР. При этом удаётся наблюдать резонансные переходы с одноврем. увеличением спинов как в одной, так и в разных подрешётках кристалла (рис. 5).

В условиях О. о. ядерных резонансов можно возбудить без внеш. магн. поля  $H$ , если промодулировать поляризацию или интенсивность возбуждающего света с частотой вблизи частоты ларморовой прецессии ядерных спинов в поле  $H_{ЯСС}(S)$ . В этом случае роль внеш. поля  $H$  играет осциллирующее поле электронов  $H_e$ .

Оптич. детектирование электронного парамагн. резонанса (ЭПР) основано на уменьшении соуданной светом равности асимметрий полудерной  $\pm 1/2$  в зоне проводимости под действием переменного поля  $H_1$  с частотой ЭПР. Уменьшение поляризации люминесценции в условиях ЭПР позволяет регистрировать резонанс

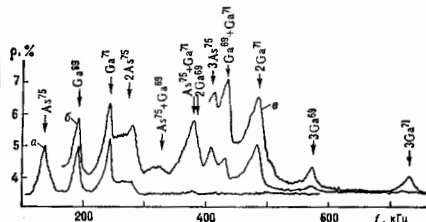


Рис. 5. Спектр ЭПР в кристалле GaAs при  $T = 1,9$  К и разных амплитудах переменного магнитного поля (рис. 2): а — односпиновый резонанс ( $H_1 \approx 0,16$  Э), б — одно- и двухспиновые ( $H_1 \approx 1,6$  Э), в — двух- и трёхспиновые ( $H_1 \approx 9,6$  Э).

при малой концентрации неравновесных электронов. Так были определены  $g$ -факторы ряда полупроводников, для  $k$ -рых обычная техника ЭПР была неэффективной.

Сплавная ориентация горячих электронов. Корреляция между ориентациями спинов  $p$  импульсов электронов в момент их возбуждения в кристаллах АПВУ приводит к возрастанию степени циркулярной поляризации «горячей» люминесценции, наблюдаемой на КВ-краю линии рекомбинации, излучения ( $p > 0,4$  для GaAs). Продольное (относительно возбуждающего луча) магн. поле  $H$  нарушает корреляцию спина и импульса электронов из-за различия циклотронной частоты, характеризующей изменение импульса, и ларморовой частоты прецессии спина. Это приводит к необычному изменению циркулярной поляризации люминесценции в продольном магн. поле — величина  $p$  уменьшается. Анализ зависимостей  $p(H)$  позволяет изучать в стационарных условиях быстротекающие процессы импульсной релаксации с характерными временами  $\tau \leq 10^{-13}$  с.

Лит.: Дьяконов М. И. и др., Ориентация электронных спинов в полупроводниках, «УФН», 1971, т. 103, с. 772; Захаревич В. П. и др., Спектр и поляризация фотолюминесценции горячих электронов в полупроводниках, «УФН», 1982, т. 136, с. 453; Оптическая ориентация, под ред. Б. П. Захаревича и Ф. Майера, М.—Л., 1990. В. Г. Флейшер.

**ОПТИЧЕСКАЯ ОРИЕНТАЦИЯ** парамагн. атомов в т. н. атомов газа — ориентация в определённом направлении угл. моментов (механических и связанных с ними магнитных) атомов (или ионов) под действием поляризованного по кругу оптич. излучения резонансной частоты. Открыта А. Кастлером (A. Kastler) в 1953. О. о. является частным случаем оптич. накачки — перевода вещества в неравновесное состояние в процессе поглощения им света.

При О. о. в отсутствие магн. поля угл. моменты атомов ориентируются по или против направления луча ориентирующего света в зависимости от знака круговой поляризации света, а также от сочетания величин угл. момента в основном ( $J_0$ ) и возбуждённом ( $J$ ) состояниях атома. Возникает суммарный макроскопич. вектор ориентации. Величина О. о. в простейшем случае двух уронеи характеризуется отношением разности населённости уровней к их сумме. При наличии магн. поля в системе сохраняется проекция вектора ориентации на направление вектора магн. индукции.

Если на время жизни возбуждённого состояния атом не подвергается столкновениям с перерывами угл. момента, то процесс ориентации можно рассматривать

как следствие закона сохранения проекции угл. момента в системе атом — излучение: каждый фотон циркулярно поляризов. света обладает проекцией угл. момента ( $\pm \hbar$ ) на направление своего распространения и, будучи поглощён, передаёт эту угл. момент возбуждённому атому — ориентирует его. Спонтанное излучение возвращает атом в осн. состояние, причём ориентация атома в среднем сохраняется (вследствие изотропии спонтанного излучения).

Если ориентация возбуждённых атомов устраняется в результате столкновений, то ориентация атомов в осн. состоянии может возникать за счёт различия вероятности возбуждения атомов, по-разному ориентированных относительно луча света. При этом ориентация совпадает со знаком поляризации света, если  $J_0 > J$ , и противоположна при  $J_0 < J$ . Это приводит к зависимости знака и величины О. о. атомов от спектрального состава ориентирующего света. Так, атомы щелочных металлов в буферных газах (см. ниже) ориентируются двумя линиями гл. дублета (переходы  $J_0 = 1/2 \rightarrow \rightarrow J = 1/2$  и  $J_0 = 1/2 \rightarrow J = 3/2$ ) в противоположные стороны, а поэтому ориентация возникает лишь в меру различия интенсивностей этих линий.

Равновесное значение О. о. устанавливается в процессе конкуренции ориентирующего действия света, пропорц. произведению интенсивности света на вероятность поглощения, и процессов дезориентации при межатомных столкновениях и при столкновениях ориентиров. атомов со стенками сосуда. Для атомов, угл. момент  $k$ -рых имеет чисто спиновую природу ( $S$ -состояние), сечения дезориентирующих столкновений с частицами без спинового момента оказываются очень малыми (менее  $10^{-30}$  см<sup>2</sup> для инертных газов). На атом основании использования таких (т. н. буферных) газов, присутствие  $k$ -рых не разрушает ориентацию и одновременно увеличивает время диффузии атомов к стенке сосуда, где ориентация теряется.

Др. эффективное средство сохранения О. о. — за счёт снижения скорости релаксации, к-рое происходит при нанесении на стенки сосуда спел. покрытий с малой энергией адсорбции ориентируемых атомов (напр., парафины). Указанные методы позволяют достичь врем. релаксации спина вплоть до 1 с. Для ряда ядерных парамагнетиков (атомы металлов второй группы, гелий <sup>3</sup>He) времена релаксации спина ядра могут быть ещё много выше. Длит. времена релаксации позволяют ориентировать атомы светом малой интенсивности, обычно  $< 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Возникающая О. о. атомов наиб. эффективно детектируется по сопутствующей оптич. анизотропии вещества — по круговому дихроизму поглощения и люминесценции и по круговому дублету лючерефрактоинде.

Процесс О. о. атомов непосредственно применим к атомам щелочных металлов, металлов второй группы (Cd, Zn, Hg), к атомам инертных газов в метастабильных состояниях и к нек-рым др. С появлением перестраиваемых лазеров стало возможно ориентировать кроме атомов и молекулы, для  $k$ -рых характерны большие сечения разрушения ориентации. Мн. объекты, для  $k$ -рых прямая О. о. не осуществима по тем или иным причинам (атомы с линиями поглощения в недоступной спектральной области, ионы, свободные электроны), могут ориентироваться при столкновениях с непосредственно ориентируемыми атомами (спиновый обмен).

Техника О. о. атомов проста. Атомарный пар в прозрачной колбе с буферным газом (или буферным покрытием стенок) облучается светом газового разряда в парах того же элемента,  $k$ -рый подвергается ориентации. Ориентирующий свет перед облучением паров поляризуется и фильтруется по частоте. Постоянные и переменные магн. поля, налагаемые на рабочий объём, изменяют состояние ориентации, что фиксируется обычно с помощью фотодетектора, измеряющего интенсивность прошедшего света. Часто О. о. осуществляется в атомных пучках.

О. о. атомов вместе с оптич. детектированием состояния ориентации применяется прежде всего в магнито-резонансных исследованиях [метод двойного радиооптического резонанса (ДРОР), см. *Двойной резонанс*]. По чувствительности, определяемой мнж. концентрацией исследуемых частиц, ДРОР на много порядков превосходит обычные методы магн. резонанса и успешно конкурирует с методом молекулярных и атомных чучков, будучи технически несравненно более простым. Для исследования магн. резонанса возбужденных атомов метод ДРОР является единственным возможным.

О. о. используются также в исследованиях радионуклидов. Для атомов, ядра к-рых обладают угл. моментом, О. о. электронной оболочки сопровождается ориентацией ядер, что обнаруживается по анизотропии вылета продуктов распада аядер. Этот эффект позволяет проводить измерения *изотопических сдвигов* и сверхтонкой структуры спектральных линий короткоживущих изотопов в исчезающе малых концентрациях (единицы атомов в  $1 \text{ см}^3$ ).

Техн. приложения О. о. атомов в основном связаны с измерениями величин магн. поля. Большие времена релаксации обеспечивают узость линий магн. резонанса (единицы Гц), что позволяет с большой точностью измерять их частоту с тем самым индукцию магн. поля. Магнитометры на этом принципе (*квантовые магнитометры*) используются для измерений полей геомагн. диапазона и ниже. Их гл. достоинство — очень высокая чувствительность (до  $10^{-12}$  Тл/Гц), не зависящая от величины индукции измеряемого поля.

Для атомов, обладающих как электронным, так и ядерным угл. моментом, возможен особый вид О. о., при к-ром достигается взаимная ориентация ядерного и электронного угл. моментов с сохранением изотропии распределения суммарного угл. момента. Этот тип О. о. наз. *сверхтонкой оптической накачкой* и осуществляется яполяризованным в строго монохроматич. светом, возбуждающим атомы с одного из подуровней сверхтонкой структуры осн. состояния. Сверхтонкая накачка применяется в *оптических стандартах частоты*. Напр., в рубидиевых стандартах частоты в качестве эталонного используют переход  $6834 \text{ МГц}$  атомов  $^{87}\text{Rb}$ . Также стандарты обеспечивают постоянство частоты в пределах до  $10^{-11}$  от номинального значения, отличаясь простотой конструкции, малой ценой и габаритами.

О. о. является частным случаем анизотропии распределения проекций угл. момента в атомном ансамбле, возникающей под действием света. В общем случае такая анизотропия описывается тензором ранга  $2J_0$  (статистич. тензор). Ориентация соответствует вект. ор. компоненты к-рого включаются в матрицу компонент тензора. Кроме ориентации вторым важнейшим типом анизотропии служат *выстраивание*, описываемое тензором второго ранга. Выстраивание возможно при  $J_0 \geq 1$ .

Лит.: Скронский Г. В., Изюмова Т. Г., Оптическая ориентация атомов и ее приложения, «УФН», 1961, т. 73, с. 425; Дьяков Ю. В. М. И. и др., Ориентация электронных спинов в полупроводниках, «УФН», 1971, т. 105, с. 772; Нареф В., Optical pumping, «Rev. Mod. Phys.», 1972, т. 44, № 2, p. 169; Optical orientation, Амст. — [а. о.], 1974.

В. В. Александроу.  
**ОПТИЧЕСКАЯ ОСЬ** кристалла — направление в кристалле, вдоль к-рого скорости распространения необыкновенного и обыкновенного лучей равны, т. е. в этом направлении не наблюдается *двойное лучепреломление*. Реализуют О. о. 1-го рода (бириндаль), вдоль к-рых равны лучевые скорости, и О. о. 2-го рода (бириндаль), вдоль к-рых равны нормальные скорости. См. *Кристаллооптика*.

**ОПТИЧЕСКАЯ ОСЬ** линзы (вогнутой или выпуклой зеркала) — прямая линия, являющаяся осью симметрии преломляющих поверхностей линзы (или отражающей поверхности зеркала); проходит через центры этих поверхностей перпендикулярно к ним. Оптич. поверхности, обладающие О. о., наз. осесим-

метричными (см. *Зеркало* оптическое, *Линза*). О. о. оптич. системы — общая ось всех входящих в систему линз и зеркал.

**ОПТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ** ( $D$ ) — мера непрозрачности слоя вещества толщиной  $l$  для световых лучей; характеризует ослабление оптич. излучения в слоях разл. веществ (красителях, светофильтрах, растворах, газах и т. п.). Для неотражающего слоя  $D = \lg I_0/I = k \cdot l$ , где  $I$  — интенсивность излучения, прошедшего поглощающую среду;  $I_0$  — интенсивность излучения, падающего на поглощающую среду;  $k_x$  — *поглощения показатель* среды для получения с длиной волны  $\lambda$ , связанный с уд. показателем поглощения  $\chi_\lambda$  в *Бугера — Ламберта — Верэ законе* соотношением  $k_x = 2,303\chi_\lambda$ . О. п. может быть определена и как логарифм величины, обратной *пропускающей коэффициенту*  $\tau$  слоя вещества:  $D = \lg(1/\tau)$ . Введение О. п. удобно при вычислениях, т. к. она является на нек. единицу, тогда как величина  $I_0/I$  может для разл. образцов и на разл. участках спектра изменяться на нек. порядков. О. п. смеси не реагирующих друг с другом веществ равна сумме О. п. отд. компонентов.

Л. Н. Натерский.

**ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ** — передача информации с помощью эл.-магн. волн оптич. диапазона. Идея О. с. известна человечеству давно (обыкновенные костры, с кон. 18 в. семифорная азбука), однако лишь с созданием лазеров появилась реальная возможность построения широкополосных систем О. с.

Особенностью оптич. информ. систем является большая пропускная способность, обусловленная высоким значением несущей частоты, и, следовательно, возможность передачи больших объемов информации с большой скоростью (с). Малая угл. расходимость лазерного луча обеспечивает пространств. скрытность и высокую энергетич. помехоустойчивость передачи информации по оптич. каналу связи при малых габаритах приёмо-передающих устройств.

**Физическая модель системы О. с.** состоит в том, что информ. сигнал в кодирующем устройстве преобразуется в вид, удобный для модуляции, затем поступает в подмодулятор-усилитель и далее в шель возбуждения модулятора. С помощью внеш. или внутр. модулятора осуществляется модуляция амплитуды, интенсивности, частоты, фазы или поляризации сигнала несущей частоты в соответствии с информ. сигналом (см. *Модуляция света*). Затем модулиров. лазерный луч коллимируется оптич. системой и посылается на объект. С помощью приёмной оптич. системы сигнал фокусируется на фотоприёмник, выходящий электр. сигнал к-рого обрабатывается далее с целью выделения информ. сигнала. Возможны два способа приёма оптич. сигнала — прямое детектирование и гетерод. В гетеродинамических приёмных системах и в системах связи на поднесущей частоте сигнал преобразуется или переносится в НЧ-область.

Оптич. системы связи делятся на открытые — наемные или космические, и закрытые — световодные. Оптич. линии связи в атмосфере сильно зависят от метеословий, от наличия пыли, дыма и др. включений. Турбулентные явления в атмосфере приводят к флуктуациям показателя преломления среды и, следовательно, к искажениям луча и флуктуациям угла прихода излучения на фотоприёмник.

Высокая степень когерентности лазерного излучения позволяет использовать помехоустойчивые методы модуляции — частотную, фазовую и поляризационную. Известны системы О. с. с применением поляризац. модуляции излучения непрерывных газовых лазеров (лазер He — Ne с  $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$  и  $\text{CO}_2$ -лазер с  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ ) для передачи как аналоговой, так и цифровой информации. Для передачи последней наиб. удобна импульсная модуляция интенсивности *популярных лазеров* током накачки.

Дальность действия линии О. с. в наземных условиях ограничена пределами прямой видимости. Однако

можно осуществлять загоризонтную связь, используя рассеяние света атмосферой — лазерные линии связи с ат. каналом рассеяния.

Среди открытых линий связи перспективны линии связи Земля — космос и космос — космос, где на больших расстояниях (напр.,  $1,6 \cdot 10^8$  км до планеты Марс) необходимо передавать большой объём информации с большой скоростью ( $10^8$  бит/с).

**Закрытые линии связи.** В земных условиях наиб. перспективны закрытые волоконно-оптич. линии связи (ВОЛС). Малое затухание оптич. сигналов в одномодовых волоконных световодах на основе кварцевого стекла (см. *Волокнистая оптика*) и ряд их принципиальных преимуществ перед проводной связью дают возможность широкого использования их в протяжённых линиях связи.

Многомодовые ВОЛС имеют принципиальные ограничения по протяжённости и по скорости передачи цифровой информации, определяемые затуханием и уширением импульсов оптич. сигналов. Последнее обусловлено модовой и хроматич. дисперсиями многомодового оптич. волокна. Использование одномодовых волоконных световодов с малым затуханием (0,2 дБ/км) совместно с полупроводниковыми лазерами, работающими с мин. шириной спектра излучения, позволяет свести к минимуму влияние дисперсии на  $\lambda = 1,3$  мкм и передавать цифровую информацию с высокой скоростью и на большие расстояния.

Параметром для оценки возможностей высокоскоростной передачи информации является произведение скорости передачи информации на расстояние. Для одномодовых ВОЛС на длине волны излучения 1,55 мкм этот параметр может превышать 200 (Гбит/с)·км.

Специфич. особенностью систем О. с. в сравнении с радиотехн. системами является ограниченная величина энергетич. потенциала — отношение мощности источника излучения к мощности оптич. сигнала, поступающей с выхода волоконной линии в фотоприёмник и необходимой для регистрации сигнала с требуемой вероятностью ошибки (не более  $10^{-9}$ ).

Для выделения информ. сигнала на приёмник должно поступать определённое число фотонов. При увеличении скорости передачи информации и сохранении при этом одной и той же вероятности ошибки должна возрастать оптич. мощность, детектируемая фотоприёмником. Поэтому актуальной задачей является разработка волоконных световодов с малым затуханием и эфф. систем ввода и вывода излучения из световода.

Наряду с быстрейшим и помехозащищённостью волоконные линии передачи сигналов информации должны обладать достоверностью и стабильностью метрологич. характеристик. Это практически исключает использование в ВОЛС амплитудной модуляции, т. к. величина сигнала на выходе линии связи зависит от обстановки в линии связи, в частности от затухания. Кроме того, деградация со временем излучателей и приёмников, температурные эффекты и др. факторы могут приводить к ухудшению качества связи. Наиб. перспективной является передача цифровой информации с помощью импульсных методов модуляции.

Разработка долгоживущих ( $\sim 10^4$  ч) полупроводниковых лазеров с  $\lambda = 1,3$  мкм и полосой частот модуляции до 10 ГГц, широкополосных высокочувствит. фотоприёмных устройств, а также световодов с малыми потерями приведёт к доминирующему положению О. с. уже в ближайшее время.

В наст. время (90-е гг.) построены и успешно эксплуатируются многочисл. волоконные линии О. с. Перспективно применение ВОЛС для кабельного телевидения, передачи информации в вычислит. технике и системах спец. внутрисубъектовой связи, межконтинентальных линиях связи.

Развитие линий О. с. связано с развитием *интегральной оптики*. Использование планарных волноводных модуляторов, переключателей, ответвителей, филь-

ров и т. д. позволяет создать быстродействующие, широкополосные, эфф. линии О. с. для высокоскоростной передачи информации.

Лит.: П р а г т В., Лазерные системы связи, пер. с англ., М., 1972; Волоконно-оптическая связь. Приборы, схемы и системы, пер. с англ., М., 1982; Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу, М., 1985; Х и н р и к у с Х. В., Шумы в лазерных информационных системах, М., 1987; Техника оптической связи. Фотоприменения, пер. с англ., М., 1988; Га у з р Д., Оптические системы связи, пер. с англ., М., 1989. Ю. В. Попов, В. В. Волконский.

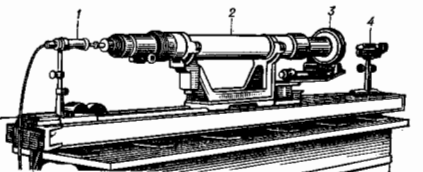
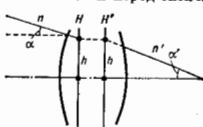
**ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА (Ф)** — величина, характеризующая преломляющую способность осесимметричных оптич. систем (линз и систем таких линз). Преломление луча, проходящего через оптич. систему с О. с. Ф, определяется по ф-ле  $\Phi = (n'\alpha' - n\alpha)/h$ , где  $\alpha$  и  $\alpha'$  — углы параксимального луча с осью системы до и после преломления;  $h$  — высота пересечения луча с гл. плоскостями  $H$  и  $H'$ ;  $n'$  и  $n$  — показатели преломления сред, расположенных соответственно за и перед оптич. системой (рис.).

О. с. сферич. поверхности радиуса  $r$ , разделяющей две среды с  $n$  и  $n'$ , равна  $\Phi = (n' - n)/r$ . О. с. — величина, обратная фокусному расстоянию системы.  $\Phi = n'/f' - n/f$ ;  $f'$  и  $f$  — заднее и переднее фокусные расстояния системы (см. *Кардинальные точки оптической системы*). Для систем, находящихся в воздухе ( $n = n' = 1$ ),  $\Phi = 1/f'$ . О. с. измеряется в диоптриях (д-тр), она положительна для собирающих систем и отрицательна для рассеивающих.

О. с. системы из двух компонентов (двух линз или двух сферич. поверхностей), обладающих О. с.  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , определяется ф-лой  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2$ , где  $d$  — расстояние между задней гл. плоскостью первого компонента и передней гл. плоскостью второго для случая двух линз в воздухе.  $d = \Delta/n'$  для двух сферич. поверхностей ( $\Delta$  — расстояние между вершинами сферич. поверхностей,  $n'$  — показатель преломления среды).

Понятием О. с. особенно широко пользуются в очковой оптике (см. также *Линза*).

**ОПТИЧЕСКАЯ СКАМЬЯ** — установка, состоящая из длинной прямоугольной станины спец. сечения с устанавливаемыми на ней рейтерами, к-рые могут свободно вдоль неё перемещаться или жёстко закрепляться (рис.). Рейтеры состоят из различных оптич. устройств и держателей для крепления оптич. деталей,



Оптическая скамья ОСК-2: 1 — осветитель; 2 — коллиматор; 3 — суппорт с вращающейся универсальной оправкой; 4 — микронспин.

узлов и приборов, к-рые расположены на одной оптич. оси. О. с. предназначается для визуальных, фотогр. и фотоэлектр. исследований оптич. приборов. С её помощью определяют центрированность и разряжающую способность оптич. систем и измеряют их оптич. характеристики: фокусные расстояния, увеличения, диаметры входных и выходных зрачков, коэф. пропускания света, aberrации и т. д.

Лит.: А ф а н а с е в В. А., Оптические измерения, М., 1961.

**ОПТИЧЕСКАЯ ТЕОРЕМА** в квантовой теории  $n$  — соотношение между полным сечением рассеяния  $\sigma_t$  и мнимой частью амплитуды рассеяния  $f(\theta)$  на нулевой угол:

$$\sigma_t = (4\pi/k) \text{Im} f(0), \quad (4)$$

где  $k$  — волновое число,  $\theta$  — угол рассеяния в системе центра инерции. Соотношение (4) следует из выражения амплитуды упругого рассеяния

$$f(\theta) = \frac{1}{2ik} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)(\eta_l - 1) P_l(\cos\theta) \quad (2)$$

бесспиновой частицы на сферически-симметричной мишени. Здесь  $P_l$  — полиномы Лежандра,  $\eta_l$  — перекрестные комплексные числа, не превосходящие по абс. значению единицы;  $|\eta_l| \leq 1$ , характеризующие процесс упругого и неупругого рассеяния частиц с орбитальным моментом  $l$  (в случае чисто упругого рассеяния  $|\eta_l| = 1$  и они представимы в виде  $\eta_l = \exp(2i\delta_l)$ ,  $\delta_l$  — фаза рассеяния). Сравнение мнимой части амплитуды (2) при  $\theta = 0$  с суммой полных сечений упругого ( $\sigma_{\text{упр}}$ ) и неупругого ( $\sigma_{\text{неупр}}$ ) рассеяния

$$\sigma_{\text{упр}} = \iint |f(\theta)|^2 d\Omega = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) |\eta_l - 1|^2, \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{неупр}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) (1 - |\eta_l|^2) \quad (4)$$

непосредственно приводит к соотношению (1), где

$$\sigma_t = \sigma_{\text{полн}} = \sigma_{\text{упр}} + \sigma_{\text{неупр}}. \quad (5)$$

Однако область применимости (1) гораздо шире, и О. т. имеет место как при отсутствии сферич. симметрии в рассматриваемой задаче рассеяния, так и при наличии спина у падающей частицы и (или) у частицы-мишени. Соотношение (1) отражает очевидный физ. факт выбывания частиц из пучка, прошедшего через мишень, как это следует из определения сечения рассеяния

$$d\sigma = j_{\text{рас}} dS / j_{\text{пад}}, \quad (6)$$

где  $j_{\text{пад}}$  и  $j_{\text{рас}}$  — плотности потока вероятности падающих и рассеянных частиц ( $dS$  — элемент площади). Ослабление прошедшей волны может быть связано лишь с интерференцией падающей волны с рассеянной на нулевой угол. Для изучения роли интерференции необходимо рассмотреть баланс ухода и прихода частиц через поверхность некоей достаточно удаленной сферы радиуса  $r$ . При чисто упругом рассеянии это означает равенство нулю потока вероятности через данную сферу. Составленная для волновой ф-ции, отвечающей задаче рассеяния,

$$\Psi_{r-\infty} \approx \frac{1}{\sqrt{v}} \left\{ e^{ikr} + \frac{f(\theta, \varphi)}{r} e^{ikr} \right\} \quad (7)$$

( $v$  — скорость частицы; для удобства волновая ф-ция (7) нормирована на единичную падающую плотность потока), радиальная компонента плотности потока вероятности имеет вид

$$j_r = \frac{\hbar}{m} \text{Im} \left( \Psi \frac{\partial \Psi^*}{\partial r} \right) \approx \cos\theta + \frac{|f(\theta, \varphi)|^2}{r^2} + j_{\text{интерфер}}, \quad (8)$$

где первое слагаемое описывает падающие частицы, второе — рассеянные, а третье

$$j_{\text{интерфер}} = \text{Im} \left\{ i(1 + \cos\theta) / r^2 \exp[ikr(1 - \cos\theta)] \right\} \quad (9)$$

представляет собой ту часть плотности потока вероятности, к-рая описывает интерференцию падающих и рассеянных частиц. Т. о.,

$$\iint j_r dS = 0, \quad (10)$$

т. е. все влетевшие внутрь сферы частицы вылетают

из неё. Из (10) следует

$$\sigma_{\text{упр}} + \iint j_{\text{интерфер}} dS = 0. \quad (11)$$

Из-за осцилляций при изменении  $r$  выражения (9) (тем более быстрых, чем большие  $r$ ) интеграл в (11) «сбавается» в малой области углов  $\theta$  вблизи  $\theta = 0$  и в пределе при  $r \rightarrow \infty$  равен

$$\iint j_{\text{интерфер}} dS = -4\pi k^{-1} \text{Im} f(0) = 0. \quad (12)$$

Если имеют место неупругие процессы, то возникает обусловленный ими дефицит уходящих частиц (по сравнению с приходящими), равный сечению неупругого рассеяния:

$$\iint j_r dS = -\sigma_{\text{неупр}}. \quad (13)$$

откуда сразу следует соотношение (1).

Необходимая модификация вида соотношения (1), вызванная учётом спина, иллюстрируется рассмотрением рассеяния частицы со спином  $1/2$  на бесспиновой мишени. В этом случае амплитуда рассеяния является перекрестным оператором и содержит два слагаемых: одно отвечает упругому рассеянию без изменения ориентации спина [оно обозначено через  $f(\theta, \varphi)$ ], второе же равно произведению некоей ф-ции  $g(\theta, \varphi)$  на оператор перерота спина (spin-flip). Очевидно, что с падающей волной интерферирует лишь амплитуда  $f(\theta, \varphi)$ , поэтому опять имеет место соотношение (1), в к-ром, однако, полное сечение упругого рассеяния

$$\sigma_{\text{упр}} = \iint |f(\theta, \varphi)|^2 d\Omega + \iint |g(\theta, \varphi)|^2 d\Omega \quad (14)$$

содержит вклады от обеих амплитуд рассеяния: без перерота и с переротом спина.

Одним из осн. применений О. т. является *дисперсионная соотношений метод*.

Дисп. Р. в в. л. г. Е. Scattering of slow electrons by neutral atoms. *Физ. Журн.*, 1932, т. 40, р. 40; Л. и Я. и Я. Л. Д. Л. и Ф. Л. Е. М., Квантовая механика, 4 изд., М., 1959; Л. и Ф. Л., Квантовая механика, пер. с англ., 2 изд., М., 1958. С. П. Алышев.

**ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА** (оптическая толщина)  $s$  — безразмерная величина, характеризующая ослабление оптич. излучения в среде за счёт поглощения и рассеяния. Для оптич. однородного слоя толщиной  $l$  О. т.  $\tau = \epsilon l$ , где  $\epsilon$  — объёмный *ослабляющий*

*показатель* среды. В неоднородной среде  $\tau = \int \epsilon(z) dz$

( $z$  — нормаль к слою). В слое, в к-ром происходит только поглощение и нет испускания излучения, интенсивность пучка света  $I(l)$ , прошедшего путь  $l$ , определяется *Буэра — Ламберта — Бера* законом:  $I(l) = I(0) \exp(-\tau)$ , где  $I(0)$  — интенсивность пучка, входящего в слой. Слой единичной О. т. ослабляет излучение на  $1/e$  раз.

Слой вещества, для к-рого  $\tau > 1$ , наз. оптич. толстым, такой слой практически непрозрачен для прямого излучения, если  $\tau < 1$ , слой наз. оптич. тонким. Т. к. показатель ослабления зависит от длины волны  $\lambda$ , то один и тот же слой вещества может быть оптич. толстым для одного вида излучения и оптич. тонким для другого. О. т. безоблачной атмосферы (для  $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$ ) равна  $\approx 0,3$ , облаков над суши  $\approx 10$ , над океаном  $\approx 20$ ; О. т. солнечной фотосферы  $\sim 3$ , хромосферы  $\sim 1$  (для одних линий  $> 1$ , для других  $< 1$ ), т. солнечной короны  $\sim 10^{-6}$ .

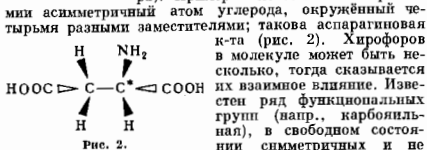
Понятие О. т. пользуются при изучении *мутных сред*, в теории *переноса излучения*. В нек-рых разделах оптики (фотометрия, светотехника) пользуются эквивалентным ей понятием *коэффициент*  $T = \exp(-\tau)$  или *оптической плотности*  $D = -\lg T = \tau / 2,303$ .

**ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА** — вещества, вращающие плоскость поляризации проходящего через них света. О. а. в. делится на две группы. В первой из них оптич. активность (ОА) связана с асимметричным

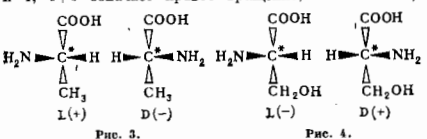


строением молекулы, не имеющей ни центра, ни плоскостей симметрии, т. е. хиральной. В этом случае ОА вещества проявляется во всех агрегатных состояниях и растворах. Ко второй группе относятся вещества, ОА к-рых связана с асимметричной структурой самого вещества.

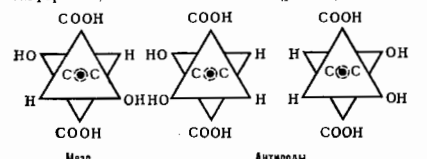
Примером О. а. в. первой группы является гексагелиден, молекула к-рого состоит из цепочки бензольных колец, расположенных по спирали (рис. 1). Процессы, приводящие к возникновению ОА, в этом случае охватывают всю молекулу в целом, рассеяние фотонов происходит в асимметричной области полностью деполяризованных электронов. В др. случаях ОА может быть связана с явлением в молекуле асимметричного центра (хиралофора). Пример — известный в стереохимии асимметричный атом углерода, окруженный четырьмя разными заместителями; такова аспартиновая к-та (рис. 2). Хиралофоров в молекуле может быть несколько, тогда сказывается их взаимное влияние. Известен ряд функциональных групп (напр., карбонильная), в свободном состоянии симметричных и не имеющих ОА, но легко деформируемых асимметричными возмущениями со стороны др. частей молекулы. О. а. в. могут быть положительными (правовращающими при наблюдении навстречу волне) и отрицательными (левовращающими). При этом знак оптич. вращения в общем случае не совпадает со знаком структуры молекулы. Хиральные молекулы, обладающие энантиоморфизмом, могут существовать в двух зеркально симметричных формах — правой и левой (см. *Измеряемая молекула*). Эти две изомерные формы молекул наз. энантиомерами или антиподами: они могут переходить одна в другую, будучи разделены потенциальным барьером, высота к-рого определяется внутримолекулярными взаимодействиями и может быть очень различной (время перехода от  $10^{-3}$  с до неск. лет). Физ. и хим. свойства антиподов одинаковы. Смесь антиподов в равных количествах наз. рацематом, она не обладает оптич. активностью. Оптически активные антиподы обозначаются в соответствии со знаком их структуры буквами *D* и *L* (лат. *Dextro*, *Laevo* — правый и левый); примером могут служить аминокислоты аланин и серин (рис. 3 и 4, «+» означает правое вращение, «-» — левое).



О. а. в. имеют своеобразные спектры комбинац. рассеяния, ралеевского рассеяния, дают циркулярно поляризованный люминесценцию, что позволяет исследовать и возбужденные состояния. О. а. в. в виде кристаллов применяют в оптич. приборах и устройствах для новатора плоскости поляризации, в качестве фазовращающих пластинок, в полупроводниковых устройствах, модулирующих устройствах. В геологии О. а. в. позволяют определить минералы, компоненты нефти.



О. а. в. могут обладать и неактивными изомерами — мезоформами; такова винная к-та (рис. 5).



К О. а. в. второй группы относятся большое количество органич. соединений (ряд к-т и эфиров, сахара, стероидные соединения, сульфиды, селениды и др.). Оптич. активность обладают мн. комплексные соединения металлов (в особенности переходных Ni, Co), металлоорганические соединения, а также хиральные и холестерические жидкие кристаллы. Особо важна роль О. а. в. в биосфере. Оказывается, что все наиб. важные для живых систем вещества хиральны, причём с определённым для каждого знаком во всей биосфере. Такими *L*-аминокислоты, *D*-сахара и т. д. Различия и усвоемость и физиологич. действие антиподов: напр., *L*-сахара не усваиваются, *L*-фенилаланин вызывает неских. заболевания в отличие от безвредного *D*. Оптич. активность обладают белки, нуклеиновые к-ты ДНК и РНК, хлорофилл, гемоглобин и т. д. По этому вопросу изучения О. а. в. играют огромную роль в биофизике, биохимии, медицине и фармакологии.

Во второй группе О. а. в. оптич. активность возникает лишь в кристаллич. состоянии и обуславливается хиральной структурой самого кристалла в целом. Примером О. а. в. с активностью экзистонного происхождения является валентный кристалл кварца. Оптически активным ионным кристаллом является NiSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O, где структурный октаэдрич. элемент [Ni(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>]<sup>2+</sup> вызывает асимметричное возмущение со стороны ионов SO<sub>4</sub> и кристалла RbNO<sub>3</sub>, где оптич. активность связана с деформиров. группой NO<sub>3</sub>. При этом ОА наблюдается и на полосах шпоов металлов. Примером оптически активного кристалла может быть кристалл Те, где атомы Те расположены по спирали и вклад в ОА дают как асимметричные движения свободных носителей, так и асимметрия экзистонных зон. Примером возникновения ОА на акавказских является кристалл силленита Bi<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (вакансии по Si).

Получение О. а. в. «оптически чистом виде», т. е. в виде одного из антиподов, вообще гоноря, нетривиально. Синтезирование О. а. в. первой группы в хим. реакциях из простых исходных неактивных обычно сложно, т. к. с равной вероятностью образуются оба изомера, и получившийся продукт является рацематом. Для выделения одного из антиподов необходим т. н. асимметрический синтез с применением к-л. хирального реактива или агента (катализатора, примеси, растворителя, «затравки» одного из антиподов), благодаря чему образуется преим. один из антиподов. Известны вещества первой группы, кристаллизующиеся в энантиомерных формах (см. *Энантиомеры*), — винная к-та, бензил, комплексные амиды; однако многие из них образуют рацемич. кристаллы, конгломераты правых и левых кристаллитов, смешанные твёрдые растворы и эвтектики.

О. а. в. второй группы, как правило, — кристаллы (кварц, киноварь, теллур); однако и здесь часто пужны спец. приёмы для получения одного из энантиомеров.

О. а. в. имеют своеобразные спектры комбинац. рассеяния, ралеевского рассеяния, дают циркулярно поляризованный люминесценцию, что позволяет исследовать и возбужденные состояния. О. а. в. в виде кристаллов применяют в оптич. приборах и устройствах для новатора плоскости поляризации, в качестве фазовращающих пластинок, в полупроводниковых устройствах, модулирующих устройствах. В геологии О. а. в. позволяют определить минералы, компоненты нефти.

Лит. см. при ст. *Оптическая активность*. В. А. Кизилев.

**ОПТИЧЕСКИЕ ГАРМОНИКИ** — оптич. излучение с частотой  $\omega_n$ , кратной основной частоте излучения  $\omega$ :  $\omega_n = n\omega$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ). Возможности генерации О. г. связана с нелинейной зависимостью поляризации среды от напряжённости электрич. поля распространяющейся в ней световой волны (см. *Нелинейная поляризация*). О. г. получаются как при непосредств. преобразовании  $\omega \rightarrow \omega_n$  на нелинейностях  $n$ -го порядка, так и

при каскадных преобразованиях на квадратичной нелинейности (см. *Оптическая преобразованием частоты*).

В. В. Яблочкин.

**ОПТИЧЕСКИЕ ИЗОМЕРЫ** (энантиомеры, оптические антиподы) — изомеры молекул, содержащих хиральный центр симметрии (напр., асимметричный атом углерода, открыто к-рого атомы могут располагаться двумя зеркально противоположными способами). Такие молекулы наз. хиральными. Физ. и хим. свойства О. и. одинаковы, различие проявляется только при их взаимодействии с плоскополяризов. светом или с др. хиральными молекулами. Так, О. и. вращают плоскость поляризации в противоположные стороны (см. *Оптическая активность*). Один из О. и. молекулы считают правым ( $D$  — dexter), другой — левым ( $L$  — laevus), что обычно не связано с направлением вращения плоскости поляризации. Правые и левые О. и. одной молекулы иногда, соединяясь друг с другом, образуют довольно прочные соединения — рацематы; такие соединения (а также смеси  $D$ - и  $L$ -изомеров в равном отношении) оптически неактивны, др. физ. свойства рацематов также отличны от свойств энантиомеров, из к-рых они образовались. См. также *Изомерия молекул*.

**ОПТИЧЕСКИЕ КОМПЬЮТЕРЫ** — интенсивно разрабатываемое в 1980–90-е гг. новое поколение вычислит. техники (компьютеров) на основе использования оптич. излучения в качестве носителя информации. Составными частями О. к. служат устройства, к-рые формируют, передают, преобразуют и осуществляют др. операции над информ. и управляющими световыми потоками. Примененные оптич. излучения в качестве носителя информации имеет ряд потенциальных преимуществ (по сравнению с электрич. сигналами) благодаря след. свойствам световых потоков: 1) в линейной среде световые потоки не взаимодействуют между собой, проходя в непосредств. близости или даже пересекаясь друг с другом; 2) световые потоки могут быть локализованы в поперечном направлении до субмикронных размеров и передаваться как по световодам, так и по свободному пространству; 3) скорость распространения светового сигнала выше скорости электрического, зависящего от соотношения активных и реактивных компонент проводимости тракта передачи; 4) взаимодействие световых потоков с нелинейными средами не локализовано, а распределено во всей среде, что даёт новые степени свободы (по сравнению с электронными системами) в организации связей и создании параллельных архитектур.

Эти свойства делают О. к. способными преодолеть ограничения по быстродействию и параллельной обработке информации, свойственные совр. ЭВМ. Напр., диффр. оптич. процессор с числом параллельных каналов  $\sim 10^8 - 10^9$  может совершать до  $10^{13} - 10^{15}$  операций в секунду (при времени переключения в одном канале  $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$  с), что значительно превосходит число операций в секунду в электронных системах.

Направление развития О. к. Проникновение оптич. методов в вычислит. технику ведётся по трём осн. направлениям. Первое основано на использовании аналоговых оптич. вычислений (см. *Лампы устройств*) для решения большого класса спец. задач, связанных с необходимостью быстрого выполнения логических преобразований. Однако применение аналоговых оптич. вычислений в универсальных вычислит. системах затруднено из-за недостаточной точности аналоговых методов, накопления шумов в процессе обработки информ. светового потока и из-за малого динамич. диапазона.

Второе направление связано с использованием оптич. соединений трактов (оптич. соединений) для передачи сигналов на разл. ступенях иерархии элементов и устройств вычислит. техники. Места электрич. соединений в совр. ЭВМ — наименее надёжные элементы в их конструкции. Переход к гибридным (оптоэлектронным) системам — одно из возможных решений пробле-

мы. При этом в конструкции компьютера неизбежно появляются новые элементы — оптоэлектронные преобразователи электрич. сигналов в оптические и обратно.

Построение О. к. в к-ром носителем информации на всех этапах её обработки и передачи является только оптич. излучение, исключает необходимость многократного преобразования электрич. энергии в световую и обратно. В результате сокращаются энергетич. затраты, устраиваются многосл. преобразоват. элементы, увеличивается быстродействие. Развитие этого, третьего направления в разработке О. к. связано, в частности, с созданием оптич. элементов вычислит. техники на основе явления *оптической bistability*. Экспериментально реализованы полностью оптические логич. устройства и усилители, комбинации к-рых позволяют создавать сложные информ. системы. К таким устройствам относятся элементы булевой логики, трансформеры — оптич. транзисторы, триггеры — они же ячейки замещающих устройств, и др.

Оптические логические устройства на основе оптической bistability. Полный набор полностью оптических логич. устройств для синтеза более сложных блоков О. к. реализуется, напр., на основе пассивных нелинейных резонаторов-интерферометров, в к-рых в результате светонепропускания, изменения оптич. длины происходит сдвиг киа пропускания (резонанса) относительно длины волны падающего излучения. В зависимости от нач. условий (нач. положений киа пропускания и нач. интенсивности) в пассивном нелинейном резонаторе нелинейный процесс завершается установлением одного из двух устойчивых состояний пропускания (отражения) падающего излучения.

На рис. 1(а) и 2(а) приведены передаточные характеристики bistabilityного интерферометра (БИ) — зависимость интенсивности выходного сигнала (отражённого  $I_{отр}$  от прошедшего  $I_{пр}$ ) от интенсивности сигнала на входе  $I_{вх}$ , складывающегося из сигнала подсети  $I_0$  и выдел. сигнала  $I_1$  или  $I_2$ . Если  $I_0 + I_1 = I_{пр}$  и выдел. порогу переключения — происходит переход системы из состояния с высокой интенсивностью на выходе («1») в состояние с низкой интенсивностью на выходе («0», рис. 1, а) или наоборот (рис. 2, а). Вообще говоря, гистерезис, характерный для оптич. bistabilityности, в данном случае не обязателен. Важно лишь обеспечить достаточно большой перепад между высокой и

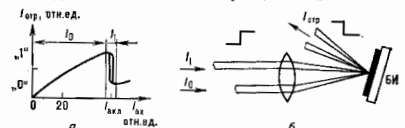


Рис. 1. Передаточная характеристика БИ в отражённом пучке (а) и схема с логической функцией «НЕ» (б).

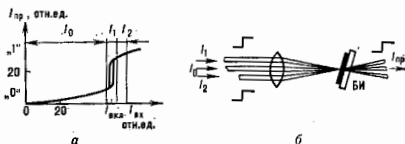


Рис. 2. Передаточная характеристика БИ в проходящем пучке (а) и схема устройства с логическими функциями «И», «ИНЕ», «ДА» (б).

низкой выходными интенсивностями по отношению к изменяемой входной интенсивности, вызывавшей этот перепад.

Элемент «ИНЕ» (см. *Логические схемы*) реализуется с использованием отражённого от БИ потока (рис. 1, б).

Интенсивность  $I_{\text{вх}}$  устанавливается несколько ниже порога переключения  $I_{\text{вкл}}$ , что соответствует высокой интенсивности отраженного сигнала. Незначит. добавка  $I_1$  приводит к резкому уменьшению интенсивности  $I_{\text{отр}}$  а снятие  $I_1$  — к восстановлению высокого уровня  $I_{\text{отр}}$ .

На рис. 2(б) дана схема устройства, представляющего собой по сути оптический программируемый элемент процессора, в к-ром тот или иной вид логич. операции задается значением интенсивности подсветки  $I_0$ . На БИ кроме подсветки подаются ещё два информац. пучка  $I_1$  и  $I_2$  и на выходе рассматривается интенсивность проходящего пучка. Если интенсивность подсветки выбрана такой, что  $I_0 = I_{\text{вкл}} - 0,5I_1$  (рис. 2, а), то наличие сигнала хотя бы в одном из информац. пучков переводит элемент в единичное состояние для проходящего луча (логич. функция «ИЛИ»). При установке  $I_0 \approx I_{\text{вкл}} - 1,5I_1$  элемент включается лишь при одноврем. подаче сигнала («1») в обоих информац. каналах (функция «И»). Если выполняется условие  $I_0 < I_{\text{вкл}} - (I_1 + I_2)$ , то при любой комбинации состояний  $I_1, I_2$  на выходе имеет место нулевой уровень интенсивности (ф-ция «НЕТ»). Наконец, при  $I_0 > I_{\text{вкл}}$  БИ всегда остаётся при выключённом состоянии (ф-ция «ДА»). Для отраженного потока в этой же схеме обеспечиваются также ф-ции «ИЛИ — НЕТ» и «И — НЕТ».

Такой набор элементов является достаточным для синтеза более сложных блочов. На рис. 3 даны некоторые примеры организации взаимодействия между отд. элементами. БИ с гистерезисной зависимостью (рис. 3, а) действует как оптич. триггер с раздельными инверсными

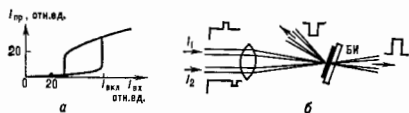


Рис. 3. Передаточная характеристика (а) и схема триггера с раздельными инверсными входами и выходами (б).

входами и выходами (рис. 3, б). Чтобы получить  $RS$ -триггер, один из входных сигналов в схеме рис. 3(б) необходимо инвертировать. ( $RS$ -триггер имеет два входа и два устойчивых состояния, к-рые меняются под действием входных сигналов, при этом обязательно попарно по одному, то с другого входа.) Инвертирование можно сделать с помощью доплотит. элемента

«НЕ» (рис. 4, а). В исходном состоянии интенсивность  $I_2$  выбрана чуть ниже порога переключения элемента «НЕ», и уровень сигнала, отражённого в направлении ТПИ, высок. Его сумма с нач. интенсивностью  $I_1$  за счёт регулятора последней соответствует примерно центр. области гистерезисной петли. ТПИ находится в состоянии с низким пропусканием (выключен). Манипуляция интенсивностью пучка  $I_2$  ( $R$ -вход) не могут изменить это состояние. Кратковременное же увеличение интенсивности  $I_1$  ( $S$ -вход) приводит к выключению ТПИ. После этого ближайшим по времени всплеском сигнала  $I_2$  триггер опрокидывается в исходное состояние.

Для создания оптических логич. элементов наряду с резонаторными используются также безрезонаторные системы, в к-рых бистабильный отклик обусловлен

$RS$ -триггер реализуется также и на основе двух «скрещенных» устройств с ф-циями «НЕ» (рис. 4, б). Введённая в систему жёсткая пологит. обратная связь приводит к тому, что первый из элементов устойчиво находится во включённом состоянии, если второй в выключённом, и наоборот. По сравнению с предыдущей эта схема полностью симметрична, но требует более тщательной юстировки.

Тыны бистабильных устройств. Осн. критериями, определяющими практич. использование оптических логич. устройств в вычислит. технике, являются их высокое быстродействие и малая световая энергия (мощность), необходимая для перевода устройства из одного устойчивого состояния в другое. Для нелинейных пассивных резонаторов эти характеристики определяются в первую очередь величиной световодящих, изменения показателя преломления нелинейной среды, помещённой между зеркалами резонатора, и добротностью последнего. С учётом необходимости интегрально-оптич. исполнения оптических логич. элементов указанным критериям наилучшим образом отвечают полупроводниковые материалы и структуры на их основе. Одной из таких структур являются вакуумно-панельные тонкоплёночные полупроводниковые интерферометры (ТПИ). Напр., ТПИ с промежуточными слоями из  $ZnS, ZnSe$  обладают сильной оптич. нелинейностью тепловой природы ( $\Delta n \sim 10^{-2}$ ) при потоках излучения  $\sim 10$  мВт, способность работать в непрерывном режиме при комнатной темп-ре, малыми размерами отд. бистабильного элемента (толщина 0,5–2 мкм, diam. 4–50 мкм), возможностью формировать двумерные интегрально-оптич. схемы на площади  $\sim 10^2$  см<sup>2</sup>, свободой выбора длин волн излучения в видимой области спектра. Осн. недостатком ТПИ с тепловым механизмом нелинейности является ограниченное быстродействие (времена переключения  $\sim 10^{-7} - 10^{-8}$  с). Использование оптич. нелинейности электронной природы в ТПИ на основе GaAs, InP, ZnSe и др. полупроводниковых слоев позволяет достигать пикосекундного быстродействия в таких устройствах при уд. энергиях переключения устойчивых состояний  $\sim 10^{-12} - 10^{-13}$  Дж/мкм<sup>2</sup>.

Увеличение нелинейного отклика в полупроводниковых резонаторах и их быстродействие достигается также при использовании в качестве нелинейной среды спец. структуры, сформированной тонкими чередующимися слоями двух полупроводниковых материалов (напр., GaAs и  $Ga_{1-x}Al_xAs$ ). Границы раздела между слоями являются *ветероперепадами*, представляющими собой потенциальные барьеры для движения носителей заряда в соседних слоях. При полной оптич. толщине такой структуры, равной неск.  $\lambda/2$  ( $\lambda$  — длина волны излучения), толщины отд. слоев в ней имеют величину  $\sim 5 - 20$  нм и, следовательно, число чередующихся пар слоев может быть  $\sim 100$  и более. Сформированная таким образом полупроводниковая *сверхрешётка* имеет период, сравнимый с характерными размерными параметрами квантовой механики. Движения носителей заряда в полупроводниках, что приводит к ограничению этого движения в соответствующих направлениях. В результате в энергетич. спектре сверхрешётки возникают особенности, обуславливающие отличия оптич. характеристик такой полупроводниковой структуры от характеристик исходных полупроводниковых материалов, в т. ч. формирование сильной оптич. нелинейности в ней при комнатных темп-рах. БИ, использующие, напр., нелинейное изменение показателя преломления в эпитаксиальной области спектра в промежуточном слое на основе GaAs/ $Ga_{1-x}Al_xAs$ -сверхрешётки, обладают временами переключения  $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$  с и уд. энергиями переключения  $\sim 10^{-12} - 10^{-14}$  Дж/мкм<sup>2</sup>. Однако технология изготовления широкопертурных БИ на основе сверхрешёток достаточно сложна.

Для создания оптических логич. элементов наряду с резонаторными используются также безрезонаторные системы, в к-рых бистабильный отклик обусловлен

нелинейным изменением коэф. поглощения среды на длине волны падающего излучения (безразаторная бистабильность). Среди таких устройств лучшими характеристиками обладают бистабильные элементы, созданные на основе сверхрешёток и на основе стеклянных матриц, допированных полупроводниковыми микрокристаллами с размерами  $\sim 10-100$  нм.

Т. о., принципиально возможна реализация компьютеров полностью оптических, в к-рых используются как параллельная обработка информации, потоков широкоархитурными процессорами на основе бистабильных оптич. элементов, так и оптич. средства организации связей между отд. элементами и процессорами, в т. ч. с использованием статистич. и динамич. голограмм.

Концепция полностью О. к., по-видимому, наиб. адекватно соответствует естеств. ситуации, поскольку человек являлся конечным потребителем информации, наиб. её обём получает в форме оптич. образов.

Оптические нейронно-сетевые компьютеры. О. к. может значительно быстрее (на неск. порядков) решить вычислит. задачи по заданному алгоритму (структурной задаче) прежде всего вследствие высокого параллелизма. Однако при решении т. н. нерегулярных (случайных) задач, для к-рых трудно, практически невозможно, задать алгоритм, возникают большие затруднения. Решение случайных задач по сути сводится к выбору одного из множества готовых решений, к-рое является наилучшим при имеющихся входных данных. Для этого в памяти должна храниться совокупность таких решений. Обычный компьютер не обладает способностью запоминать и извлекать из памяти информацию в виде готовых решений. Это свойственно человеческому мозгу и проявляется при решении задач, связанных с распознаванием образов (такие задачи относятся к случайным). Для моделирования процесса работы мозга человека путём имитации его анатомич. нейронных структур предназначены разрабатываемые в 80-90-е гг. нейронные (нейроно-сетевые) компьютеры. Подобно мозгу, такие компьютеры должны состоять из большого числа несложных процессорных элементов, между к-рыми имеются множеств. перекрёстные связи. Такие системы должны, так же как и мозг, обладать ассоциативной памятью, способной при наличии на входе части всех признаков нек-рого объекта воспроизвести на выходе всю информацию о данном объекте. Вычисления в нейронных сетях выполняются «коллективно» в результате простых операций, выполняемых одновременно отд. нейронами, вся сеть в целом реализует более сложную Ф-цию. При такой организации процесса вычислений информация может кодироваться и запоминаться не в отд. ячейках, а установлением определённой структуры связей между ними. Нейронно-сетевые компьютеры способны также к самопробному обучению.

Нейроно-сетевая О. к. состоит из двух осн. компонентов. Это двумерная матрица оптич. переключающих (бистабильных) элементов (искусств. аналогов нейронов); состояния одних элементов изменяются в зависимости от состояния элементов, с к-рыми они соединены. С помощью световых пучков каждый элемент этой матрицы может быть соединён со всеми другими. Второй компонент — голограмма, с помощью к-рой задаются различные связи между элементами. С помощью голограмм, объём к-рой равен  $1$  см<sup>3</sup>, можно задать более  $10^9$  связей. Нейроно-сетевые О. к. способны, по-видимому, дать наилучшие результаты в задачах, связанных с принятием решений с целесообразно ограниченной точностью, т. е. в области информат. деятельности, в наиб. степени свойственной человеческому мозгу.

О. к. — это одно из будущих поколений вычислит. техники, конкретный вид к-рой будет определяться как новыми архитектурными построениями, так и новой элементной базой.

Лит.: Зябровская А., Ситон К. Т., Смит С. Д., Оптический компьютер, «В мире науки», 1983, № 4, с. 15;

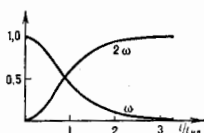
«ТИЭР», 1984, т. 72, № 7; Синицын Г. В., Полностью оптические элементы дисперсной логики на основе бистабильных тонкопленочных интерферометров, «Известия академии наук СССР», т. 14, № 3, с. 528; Абу-Мотафа Я. С., Шварцман С. Д., Оптические нейронно-сетевые компьютеры, «В мире науки», 1987, № 5, с. 42; Гиббс Х. М., Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света, пер. с англ., М., 1988; Optical computing, «Appl. Opt.», 1988, т. 27, № 9, в. 1641.

ОПТИЧЕСКИЕ ОБЪЕМЫ — см. Иллюзии оптические.

ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ — оптич. устройства для преобразования частоты лазерного излучения на основе нелинейной зависимости поляризации  $P$  среды от напряжённости электрич. поля  $E$  световой волны, распространяющейся в ней (см. Нелинейная поляризация). О. п. ч. разных типов позволяют преобразовывать частоту излучения лазера как в более коротковолновый, так и в более длинноволновый диапазоны и даже получать перестраиваемое по частоте излучение. Наиб. интерес в практич. отношении в связи с их высокой эффективностью представляют О. п. ч., использующие квадратичную зависимость  $P$  от  $E$ , т. е. первый нелинейный член в разложении нелинейной поляризации по полю:  $P^{(2)} \sim \chi^{(2)}EE$  ( $\chi^{(2)}$  — тензор нелинейной восприимчивости второго порядка). Какими О. п. ч. относятся оптич. удвоители частоты, генераторы суммарной и разностной частот, параметрич. генераторы света.

Оптические удвоители частоты (генераторы второй оптич. гармоники) позволяют эффективно преобразовывать излучение лазера с частотой  $\omega$  в излучение с удвоенной частотой  $2\omega$ . Преобразование осуществляется в нелинейных кристаллах, обладающих ненулевой квадратичной нелинейностью (кристаллы без центра инверсии) при распространении взаимодействующих волн вдоль т. н. направления фазового синхронизма. Наиб. распространены нелинейные кристаллы:  $KDP$ ,  $ADP$ ,  $CDA$ ,  $Ba_2Na_2Nb_5O_{15}$ ,  $KTP$ ,  $LiNbO_3$ . Эффективность преобразования осн. излучения во вторую гармонику определяется свойствами нелинейного кристалла, а именно: отношением  $\chi^{(2)}/n^3$  ( $n$  — показатель преломления и его длиной  $l$ , а также характеристиками пучка преобразуемого излучения (пространственным и временным профилем, энергией импульса или мощностью непрерывного излучения). Напр., при удвоении монохроматич. излучения с плоским фронтом мощность волны второй гармоники зависит от отношения  $l/l_{\text{нл}}$  ( $l_{\text{нл}} = \lambda n / 4\pi \chi^{(2)}$ ;  $\lambda$  — длина волны и  $E$  — амплитуда поля осн. излучения). По мере

Зависимость (в относительных единицах) интенсивности излучения на основной частоте  $\omega$  и на частоте второй гармоники  $2\omega$  от отношения  $l/l_{\text{нл}}$ .



распространении осн. волны в кристалле её мощность уменьшается, а мощность второй гармоники возрастает (рис.) и при  $l = 3l_{\text{нл}}$  достигает 99% от мощности осн. волны. При удвоении частоты излучения лазера  $\lambda = 1$  мкм и интенсивностью  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> в кристалле ниобата лития  $l_{\text{нл}} = 3$  см. Для реальных лазерных пучков с ограниченной апертурой, а также в импульсном режиме работы эффективность оптич. удвоителей ниже, чем в случае плоских волн. Макс. достигнутая энергетич. эффективность оптич. удвоителя составляет 90% при интенсивности накачки 3 ГВт/см<sup>2</sup>, длительности импульса 0,5 нс в кристалле  $KDP$  длиной  $l = 3$  см.

Генераторы суммарной частоты преобразуют две волны с разными частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в волну с частотой  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ . В качестве среды с квадратичной нелинейностью в этих генераторах обычно используются те же кристаллы, что и в оптич. удвоите-

ля). Генераторы суммарной частоты используются: а) в многокаскадных генераторах гармоник для дальнейшего преобразования частоты лазерного излучения в более коротковолновый диапазон (напр., при получении третьей, четвёртой, пятой и т. д. гармоник осн. излучения лазера); б) для смещения перестраиваемого диапазона частот в более коротковолновый диапазон (гл. обр. УФ) путём сложения частот перестраиваемого лазера и лазера с фиксированной частотой; в) преобразования ИК-сигналов и изображений в видимый диапазон, где чувствительность фотоприёмников существенно выше.

Генераторы разностной частоты, использующие также квадратичную нелинейность полиризации, предназначены для уменьшения частоты, для преобразования двух волн с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в волну с частотой  $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$ . Они применяются для получения когерентного излучения в ДВ-области спектра вплоть до субмиллиметровых волн, как в непрерывном режиме, так и в импульсном с нано- и пикосекундной длительностью.

Параметрические генераторы света позволяют эффективно преобразовывать излучение с фиксированной частотой  $\omega$  в две перестраиваемые по частоте волны с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , удовлетворяющим соотношению  $\omega_1 + \omega_2 = \omega$ . Они являются перспективными источниками мощного перестраиваемого когерентного излучения ИК-диапазона ( $\lambda > 1$  мкм). Энергетич. к-д импульсных перестраиваемых параметрич. генераторов света достигает 60%.

Для преобразования частоты лазерного излучения используются также и нелинейности поляризации более высокого порядка (кубическая, четвёртой степени и т. д.). Оптические умножители частоты  $n$ , использующие высшие нелинейности, позволяют в одном каскаде получать высшие гармоники осн. излучения лазера, т. е. осуществлять прямые процессы преобразования  $\omega \rightarrow 3\omega$ ,  $\omega \rightarrow 4\omega$  и т. д. Таким способом получено самое коротковолновое когерентное излучение в вакуумной УФ-области спектра с  $\lambda = 53,5$  и  $38,8$  нм путем генерации пятой и седьмой гармоник на нелинейностях  $\chi^{(5)}$  и  $\chi^{(7)}$  в He и Ne. На нелинейности  $\chi^{(9)}$  в парах Na получена девятая гармоника излучения лазера на неодимовом стекле с  $\lambda = 117$  нм. Однако эффективность таких процессов обычно невелика вследствие малости величин соответствующих нелинейных восприимчивостей среды, и поэтому заметное преобразование можно получить лишь при достаточно высоких интенсивностях осн. излучения (к-рые ограничиваются *лучевой прочностью* среды), реализуемых, как правило, для импульсов пикосекундного диапазона. В большинстве случаев для оптич. умножителей частоты более эффективным оказывается использование неск. каскадов последоват. удвоения частоты.

Важный класс О. п. ч. составляют преобразователи, использующие вынужденное комбинац. рассеяние света (см. *Вынужденное рассеяние света*) — взаимодействие световых волн и фоонов оптич. частоты на кубич. нелинейности среды, приводящее к преобразованию излучения лазера с частотой  $\omega$  в волны с частотами  $\omega \pm N\Omega$ , где  $\Omega$  — одна из осн. частот молекулярных колебаний среды (стоксов сдвиг),  $N = 1, 2, 3, \dots$  Эффективность таких О. п. ч. может быть весьма высока (см. *Комбинационный лазер*).

О. п. ч. разл. типов позволяют существенно расширить диапазон длин волн когерентного излучения и даже получать перестраиваемое излучение в разл. областях УФ-, ИК- и видимого диапазонов. Среди многочисл. применений О. п. ч. следует выделить использование их в мощнейших многокаскадных лазерных системах, предназначенных для проведения экспериментов по *лазерному термоядерному синтезу*. Эфф. преобразование излучения таких систем в более коротковолновый диапазон даёт принципиально новые возможности в решении этой важной проблемы.

Лит.: Перикс Ф., Мидьявтер Д. Дж., Прикладная нелинейная оптика, пер. с англ. М., 1976; Справочник по лазерам, пер. с англ., под ред. А. М. Прохорова, т. 2, М., 1978; Дмитриев В. И., Тарасов Л. В., Прикладная нелинейная оптика, М., 1982; Шон И. Р., Принципы нелинейности оптики, пер. с англ., М., 1989. В. В. Жданов.

**ОПТИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ** — газоразрядные явления, аналогичные *электрическим разрядам* в газе, возникающие в воздухе или др. газе под действием мощных световых (лазерных) полей. Дл изобретения лазеров изучались и использовались газовые разряды в полях более низких частот, чем оптические: в пост. электрич. поле, в ВЧ-, в СВЧ-полях. Лазерная техника открыла физике газоплазменного разряда оптич. диапазон. Различают два осн. типа О. р.: 1) лазерная и 2) кр-ая — оптич. пробой газа, т. е. бурное нарастание ионизации ранее не ионизированного газа; 2) непрерывный О. р. — содержание в газе уже имеющегося ионизов. состояния под действием светового излучения.

**Оптический пробой (ОП).** Обнаружение эффекта в 1963 [П. Мейкер (P. Maker), Р. Терхун (R. Terhune) и У. Р. Савидж (W. R. Savage)] стало возможным благодаря созданию лазера с модулятором. добротностью, к-рый даёт очень мощный, т. е. гигантский, импульс (длительность  $t \approx 30$  нс, энергия 1 Дж, пиковая мощность 30 МВт). Когда луч такого рубинового лазера сфокусирован линзой, в комнатном воздухе в области фокуса вспыхивает искра и там образовалась плазма, как при электрич. пробое разрядного промежутка между электродами. Оптич. пробой происходит, когда интенсивность излучения  $S [Вт/см^2]$  или среднеквадратичное электрич. поле световой волны  $E = 19 \sqrt{S} [В/см]$  превосходит нек-рые пороговые значения ( $S \geq 10^6$  МВт/см<sup>2</sup>,  $E \geq 6 \cdot 10^4$  В/см, в воздухе). Как показали измерения, видимая вспышка, свидетельствующая о пробое, появляется, если в области фокуса лампы рождается  $\sim 10^{18}$  электронов. Пороговые величины  $S_{пр}$ ,  $E_{пр}$  — важнейшие характеристики ОП, зависящие от рода газа, давления, частоты света, а также диаметра фокуса, длительности импульса и распределения интенсивности по сечению. При не чрезмерно высоких давлениях  $p$  пороги неуклонно понижаются с ростом давления, но, начиная с  $p \sim 10^2 - 10^3$  атм, с увеличением  $p$  растут (рис. 1). Одноатомные газы обычно пробиваются легче, чем молекулярные. На частотах,

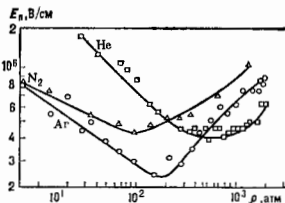


Рис. 1. Зависимость амплитуды пороговых полей  $E_p$  от давления  $p$  для пробоя газа рубинового лазера. Диаметр фокусного пятна  $10^{-3}$  см, длительность импульса по половине мощности 50 нс.

соответствующих видимой и ИК-областям спектра, пороги понижаются с уменьшением частоты: для неодимового лазера ( $\lambda = 1060$  нм) пороговые интенсивности (рис. 2) меньше, чем для рубинового ( $\lambda \approx 694$  нм). Пороговая интенсивность понижается также при увеличении радиуса фокусного пятна, т. е. размеров области, подверженной действию поля, и в небольшой степени — при увеличении длительности импульса.

ОП происходит в результате развития *ламина электр. разряда*. Первые (затравочные) электроны вырываются из атомов, молекул, возможно, мельчайших пылинкок путем *многофотонного фотоэффекта* при одноврем. поглощении неск. лазерных квантов  $h\nu$ . Нескольких — потому, что потенциалы ионизации атомов значительно больше  $h\nu$ . В поле световой волны электрон приобретает энергию, ионизует атом; вместо одного энергичного

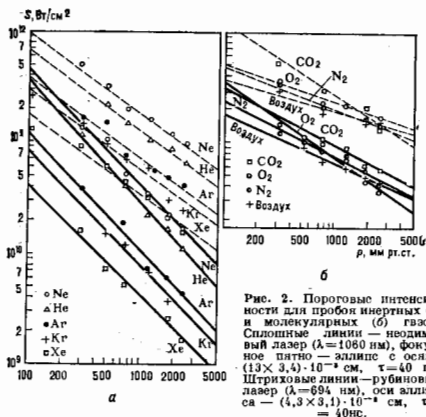


Рис. 2. Пороговые интенсивности для пробоя ионизации (а) и молекулярных (б) газов. Сплошные линии — неодимовый лазер ( $\lambda = 1064$  нм), фокусное пятно — эллипс с осями  $(1,3 \times 3,4) \cdot 10^{-3}$  см,  $\tau = 40$  нс. Штриховые линии — рубиновый лазер ( $\lambda = 694$  нм), ось эллипса —  $(4,3 \times 3,1) \cdot 10^{-3}$  см,  $\tau = 40$  нс.

При реально выполняющемся условии  $k\omega \ll \epsilon$  Флу- ( $\bullet$ ) можно приближенно применять и к излучениям рубинового и неодимового лазеров ( $\lambda = 694$  и  $1064$  нм), хотя их  $k\omega = 1,78$  и  $1,17 zB \gg \Delta\epsilon$ . В этом случае Флу следует трактовать статистически: если, напр.,  $k\omega = 100\Delta\epsilon$ , то в 99 столкновениях электронов не обменивается энергией с полем, а в сотом приобретает целый квант  $k\omega$ . Строгие расчеты электронной лавины и порогов пробоя, основанные на решении кинетич. ур-ния для электронного спектра, дают удовлетворит. количеств. согласие с измерениями.

При не слишком высоких давлениях, когда  $v_m^2 \ll \omega^2$ , классич. закон  $S_H \propto \omega^2 \propto \lambda^{-2}$  хорошо выполняется в широком диапазоне оптич. частот, вплоть до сжатия с СВЧ. Точки, соответствующие пробую воздуха излучениями разл. лазеров, группируются около классич. прямой  $\lg S_H = \text{const} - 2 \lg \lambda$  (рис. 3). В УФ-диапазоне из-за квантовых эффектов порог ОП снижается по сравнению с законом  $S_H \propto \omega^2$ .

Порог пробоя воздуха при атм. давлении излучением  $\text{CO}_2$ -лазера,  $S_H \approx (1-2) \cdot 10^8$  Вт/см $^2$ , определяется присутствием аэрозольных частиц, нагрев и испарение к-рых способ-

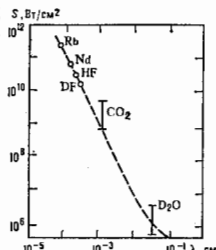


Рис. 3. Пороги пробоя воздуха при атмосферном давлении излучением разных лазеров. Штриховая линия — классический закон  $S_H \propto (\omega^2 + v_m^2)$ .

ствуют появление затравочных электронов (кванты  $\text{CO}_2$ -лазера  $k\omega = 0,124 zB$  слишком малы для многоквантового фотоэффекта). В очищенном воздухе порог повышается до  $3 \cdot 10^8$  Вт/см $^2$ . В сильно разреженных газах,  $p \leq 1$  мм рт. ст., или в случае чрезвычайно коротких, наносекундных лазерных импульсов лавина не успевает развиться и наблюдаемая ионизация обуславливается исключительно многоквантовым фотоэффекту.

Фокусирова мощней лазерный импульс лизисом с фокусным расстоянием  $\sim 10$  м, получают т. н. дивергентную искру — плазменный канал, не слышной, но длиной до десятков метров (лазерная искра от короткофокусной лизис имеет размеры  $0,1-1$  см). Пробой газа в постоянном или СВЧ-поле существенно облегчается в присутствии интенсивного лазерного излучения. Это позволило создать хорошие разрядники с лазерным подпитком, направленный пробой, при к-ром обычный искровой разряд развивается вдоль светового канала и не обязательно ориентирован по вектору поля. ОП сильно облегчается, если происходит вблизи поверхности твердых тел; при этом пороговая интенсивность может быть на несколько порядков ниже — т. н. низкопороговый пробой.

Непрерывный оптический разряд (НОР) — стационарное поддержание плотной равновесной плазмы излучением лазера непрерывного действия (напр.,  $\text{CO}_2$ -лазера); был предсказан теоретически и получен на опыте в 1970. По сравнению с традиц. способами поддержания плазмы с  $T \sim 10000$  К при помощи дугового, индукционного, СВЧ-разрядов для подвода энергии к плазме оптич. способом не требуется конструктивных элементов: электродов, индуктора, волновода. Световая энергия свободно передается на расстояние световым лучом. Это открывает возможность зажигания плазмы на расстоянии от лазера и в любых, даже труднодоступных местах. Если продувать холодный газ через горящий НОР, подобно тому, как это делается в дуговых и прочих генераторах непрерывной плазменной струи — плазмотронах, получается оптический и плаз-

электрона появляются два медленных; потом всё повторяется. Так происходит разномощное электронов.

Согласно представлениям классич. теории, в осциллирующем поле на подступ. движение электрона с энергией  $\epsilon$  накладываются колебания вдоль вектора  $E$  с энергией порядка  $\Delta\epsilon = e^2 E^2 / m \omega^2$ . При рассеянии атомом электрон начинает новое подступ. движение с энергией, в ср. на  $\Delta\epsilon$  большей, а колебания раскачиваются заново. Если эфф. частота столкновений  $\nu_m$  сравнима с круговой частотой излучения  $\omega$ , так что электрон не успевает совершить много осцилляций за период между столкновениями, то колебания раскачиваются не полностью, перекачка энергии от поля к электрону замедляется. С учётом этого обстоятельства энергия хаотич. движения электрона  $\epsilon$  вырастает в 1 с на

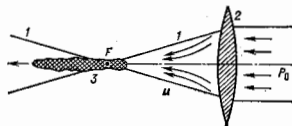
$$(d\epsilon/dt)_E = e^2 E^2 \nu_m / m (\omega^2 + \nu_m^2). \quad (*)$$

Чтобы за короткое время лазерного импульса ( $10^{-8}$  с) родилась необходимая для ОП примерно  $\log_{10}(10^{13}) \approx 40$  поколений электронов, скорость набора энергии  $(d\epsilon/dt)_E$  и определяющее её поле  $E$  должны иметь достаточно большие значения, тем более, что нужно ещё возмещать потери энергии электронов и, возможно, их исчезновение. Если  $v_m^2 \ll \omega^2$ , т. е. давление относительно невелико ( $\nu_m \propto p$ ) или частота поля высока, то скорость набора энергии от поля  $(d\epsilon/dt)_E \sim (E/\omega)^2 p$ . Само же пороговое поле  $E_H$ , при к-ром электрон успевает набрать энергию, достаточно, чтобы произвести ионизацию, пропорционально  $\omega$  и уменьшается при увеличении  $p$ .

Если давление высокое,  $v_m^2 \gg \omega^2$ , то  $(d\epsilon/dt)_E \sim E^2/p$ , а пороговое поле не зависит от частоты и растёт с ростом  $p$ . Физич. давления  $(d\epsilon/dt)_E$  максимальна при  $\nu_m = \text{const} p = \omega$ ; при таком же примерно условии минимально порог пробоя  $E_H$ . Классич. представления, безоговорочно применимые к СВЧ-излучению и ИК-излучению  $\text{CO}_2$ -лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм), качественно объясняют соответствующие пороговые зависимости  $E_H(p)$ , к-рые очень похожи на зависимости  $E_H(p)$  (рис. 1) для рубинового лазера ( $\lambda = 694$  нм). Только в случаях СВЧ- и  $\text{CO}_2$ -лазера минимумы лежат при более низких давлениях, ибо  $p \propto \omega$ , и сами пробивающие поля  $E_H \propto \omega$  меньше. А на оптич. частотах для пробоя требуются гораздо более высокие поля и минимум пробоя  $E_H$  сдвигается в сторону высоких давлений в сотни атмосфер.

м отрон (рис. 4). Темп-ра плазмы в НОР, как правило, выше, чем в дуговом разряде, — ок. 20 000 К. В опыте НОР поджигают в камере, наполненной к.-л. газом, или в комнатном воздухе, фокусируя лазерный луч линзой или зеркалом. Плазма располагается

Рис. 4. Принципиальная схема оптического плазмотрона: 1 — концы светового канала; 2 — линза; 3 — плазма; F — точка фокуса; и — газовой потока; P<sub>л</sub> — лазерное излучение.



в районе фокуса, несколько сдвигая от фокуса по направлению к источнику до того сечения светового канала, где интенсивности излучения ещё хватает для компенсации потерь энергии из плазмы, без чего нет стационарного горения. Чтобы зажечь НОР, необходимо создать начальный, поглощающий лазерное излучение очаг плазмы. Проще всего ввести в область фокуса проволоку и убрать её после зажигания разряда.

Оценить лазерную мощность P, необходимую для поддержания НОР, можно из условия баланса теплопроводностного вытекания энергии из небольшой плазменной сферы радиуса r и поглощения ею лазерной энергии. Если, как это обычно бывает, область разряда не сильно поглощает лазерное излучение,  $\mu_{\lambda} r < 1$ , где  $\mu_{\lambda}(T)$  — коэф. поглощения при темп-ре плазмы T, то

$$P = 2\pi\theta(T)/(\mu_{\lambda}(T)), \quad \theta(T) = \frac{\kappa}{6}kT.$$

Здесь  $\theta(T)$  — потенциал потока тепла,  $\kappa$  — коэф. теплопроводности. Ф-ция  $\theta(T)$  — монотонно растущая, но  $\mu_{\lambda}(T)$  при пост. давлении имеет максимум при темп-ре, соответствующей почти полной однократной ионизации. Такая примерно темп-ра  $T_m \approx 20\,000$  К и устанавливается в НОР, и ей соответствует минимальная необходимая пороговая лазерная мощность P<sub>п</sub>. В воздухе при p = 1 атм НОР устанавливается при мощности излучения СО<sub>2</sub>-лазера P<sub>п</sub> = 2 кВт; темп-ра плазмы при этом T<sub>m</sub> ≈ 17 000 К,  $\theta_m \approx 0,3$  кВт/см,  $\mu_{\lambda max} \approx 0,8$  см<sup>-1</sup>. Опыт хорошо подтверждает эти оценки. Коэф. поглощения  $\mu_{\lambda}(T_m)$  возрастает с увеличением давления ( $\sim p^{1,8} - p^2$ ), а пороговая мощность соответственно уменьшается с ростом давления; P<sub>п</sub> также уменьшается в случае тяжёлых одноатомных газов, обладающих плохой теплопроводностью (θ<sub>m</sub> меньше). Так, при поддержании НОР в ксеноне при p ≈ 3–4 атм требуется всего P<sub>п</sub> ≈ 150 Вт (рис. 5, а). При p ≥ 10 атм падение P<sub>п</sub> прекращается, т. е. на смену теплопроводностным потерям энергии постепенно приходят лучистые, κ-рые растут с p, как и μ<sub>λ</sub>.

На рис. 5 (а, б) нижними ветвями кривых показаны измеренные на опыте пороговые мощности P<sub>п</sub>. Если лазерная мощность P превышает P<sub>п</sub>, то плазма сильнее сдвигается навстречу лучу и увеличивается в разме-

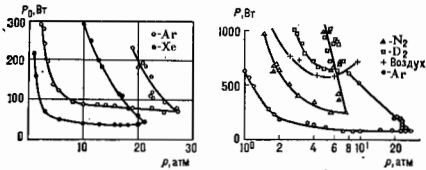


Рис. 5. Пороговые мощности, необходимые для поддержания непрерывного оптического разряда в атомарных (а) и молекулярных (б) газах (нижние ветви кривых). Верхние ветви кривых показывают верные пределы существования НОР.

рах, но темп-ра её не возрастает. Наблюдается и верхний предел существования НОР по мощности и по давлению. Его существование связано с возрастанием роли лучистых потерь при больших темп-рах и размерах плазмы и вызванной этим неустойчивостью состояний, лежащих выше и правее верхних краевых. Однако при фокусировании лазерного луча короткофокусным зеркалом верхнего предела нет — НОР наблюдается и при p ≥ 10 атм.

Спектроскопич. методами измерялись темп-ры в плазме НОР и их пространств. распределения. На рис. 6 показано пространств. распределение темп-ры (изотермы) в НОР в воздухе атм. давления. Луч СО<sub>2</sub>-лазера идёт справа налево; мощность лазера 6 кВт. Контур сходящегося светового канала показан пунктиром. В Ar при p = 2 атм достигалась темп-ра T<sub>max</sub> ≈ 18000 К, в Xe при p = 2 атм — 14 000 К, в N<sub>2</sub> при p = 6 атм — 21000 К, в N<sub>2</sub> при p = 2 атм — 22 000 К, в воздухе при p = 1 атм — 17 000 К. При aumentом превышении P

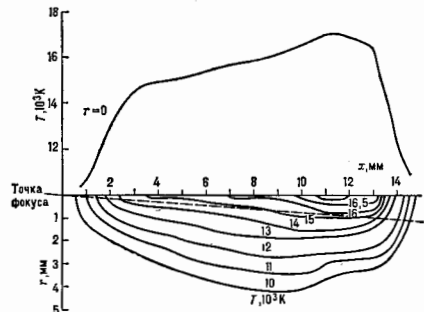


Рис. 6. Изотермы пространственного распределения температуры в НОР (снизу) и распределение T на оси луча (вверху).

над P<sub>п</sub> в плазме НОР поглощается около половины лазерной энергии, остальная проходит насквозь. Благодаря своей высокой темп-ре и хорошей стабильности НОР может служить непрерывным источником излучения очень большой калиброванной яркости. НОР часто возникает около твёрдых поверхностей, подвергаемых воздействию достаточно мощного лазерного излучения: при лазерной сварке, резке и др. Он оказывает неблагоприятное влияние на лазерную технологию, экранируя обрабатываемый материал от луча. Во избежание этих эффектов, а также и для др. целей целесообразно обдувать обрабатываемое место потоком газа (НОР «сдувается»).

Распространение О. р. Как и др. электрич. разрядом в газах, О. р. свойственна тенденция распространяться: плазменный фронт разряда может двигаться навстречу лазерному излучению. Эффекты распространения возникают вследствие ионизации газа перед фронтом плазмы. Когда холодный газ перед фронтом нагревается, ионизуется, он приобретает способность поглощать лазерный луч. Фронт разряда переходит на новое место, новая масса газа включается в разряд. Можно наблюдать и обратную картину распространения, характерную для оптич. плазматрона, когда плазменное образование локализовано в пространстве (в районе фокуса линзы, где интенсивность излучения максимальна), а холодный газ продвигается через разряд.

Существует неск. механизмов распространения О. р. 1) Нагрев и ионизация газа перед плазменным фронтом сильной ударной волной, вызванной интенсивным энерговыделением, — т. е. световая детона-

ци и я. Она обычно наблюдается сразу после пробоя газа гигантским лазерным импульсом и до его окончания. Фронт световой детонации распространяется навстречу лучу со скоростями  $\sim 100$  км/с, и газ за ним нагревается до темп-ры  $10^8$ — $10^9$ К. Зарегистрированная по измерению интенсивности рентг. излучения наб. темп-ра в такой лазерной искре составила  $3 \cdot 10^8$  К (при пиковой мощности лазерного импульса в неск. ГВт). После окончания гигантского лазерного импульса от места энерговыделения распространяется квадросферич. светящаяся взрывная волна. Эффект является миниатюрной копией ядерного взрыва в атмосфере.

2) Наблюдается медленное распространение плазменного фронта в лазерном луче со скоростями  $\sim 10$ — $40$  м/с, обзавое теплопроводностному прогреванию газа перед фронтом. Этот механизм действует преим. и в оптич. плазмотроне, где для непрерывности горения применяется непрерывный  $\text{CO}_2$ -лазер. В оптич. плазмотроне достигается на  $1000$ — $3000$  К более высокая темп-ра, чем в НОР в неподвижном газе. Продувкой воздуха снимаются верх. ограничения по мощности лазера, а также по фокусному расстоянию линзы  $f$  (в неподвижном воздухе в слабофокусированном луче, при  $f \geq 20$  см, НОР не горит).

3) Наблюдается быстрые волны ионизации в лазерном луче, распространяющиеся со скоростями  $10$ — $100$  км/с, но без ударной волны. Они вызываются ионизацией газа перед фронтом тепловым излучением плазмы (радиач. волны).

4) Наблюдались также волны пробоя.

Лит.: Островская Г. В., Зайдель А. Н., Лазерная искра в газах, «УФН», 1973, т. 111, с. 579; Райзер Ю. П., Лазерная искра и распространение плазмы, М., 1974; его же, Оптические разряды, «УФН», 1980, т. 132, с. 549.

Ю. П. Райзер.

**ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ** — совокупность оптич. деталей — линз, призм, плоскопараллельных пластинок, зеркал и т. п., скомбинированных определ. образом для получения оптич. изображений или для преобразования светового потока, идущего от источника света. В зависимости от положения предмета и его изображения различают несколько типов О. с.: *микроскоп* (предмет на конечном расстоянии, изображение — на бесконечности), *телескоп* (и предмет, и его изображение находятся в бесконечности), *объекты* (предмет расположен в бесконечности, а изображение — на конечном расстоянии), *проект. система* (предмет и его изображение расположены на конечном расстоянии от О. с.; см. *Проекцииный аппарат*). О. с. характеризуются такими параметрами, как *светосила*, *линзевое* и *угл. увеличение*, масштаб оптического изображения.

О. с. используются в техол. оборудовании, в медицине, для *оптической локаци.*, *оптической связи*, для образования плазмы и т. п.

Расчёт О. с. и устранение их aberrаций являются сложной задачей, и совр. прогресс в оптич. приборостроении связан с использованием новых материалов и расчётом О. с. с помощью ЭВМ.

Лит.: Теория оптических систем, 2 изд., М., 1981.

**ОПТИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ** — лазеры со стабильной во времени частотой излучения ( $10^{14}$ — $10^{15}$ ), её воспроизводимостью ( $10^{-12}$ — $10^{-14}$ ). О. с. применяются в физ. исследованиях и находят практич. применение в метрологии, локаци., геофизике, связи, навигации и машиностроении. Деление частоты О. с. ч. до радиодиапазона сделало возможным создание шкалы времени, основанной на использовании периода оптич. колебаний.

О. с. ч. обладают преимуществами по сравнению с *квантовыми стандартами частоты* СВЧ-диапазона: эксперименты, связанные с измерением частоты при использовании лазеров, требуют меньшего времени, т. к. абс. частота в  $10^4$ — $10^9$  раз превышает нелазерные стандарты частоты. Абс. интенсивность и ширина резонансов, являющихся реперами частоты, в оптич. диапазоне в  $10^8$ — $10^9$  раз больше, чем в СВЧ-диапазоне, при од-

ной и той же относит. ширине. Это позволяет создавать О. с. ч. с более высокой кратковрем. стабильностью частоты. При делении частоты О. с. ч. до радиодиапазона относит. ширина линии излучения практически не меняется (если используется СВЧ стандарт. флукуц. спектр его сигнала существенно расширяется при умножении частоты в  $10^8$ — $10^9$  раз). Роль квадратурного *Доплера эффекта*, ограничивающего долговрем. стабильность и воспроизводимость частоты, одинакова.

**Принцип стабилизации.** Стабилизация частоты лазера, как и стандартов радиодиапазона, основана на использовании спектральных линий атомного или молекулярного газа (оптич. реперы), к центру к-рых привязывается частота  $\nu$  с помощью электронной системы автоматич. подстройки частоты. Т. к. линии излучения лазеров обычно значительно превосходят ширину полосы пропускания *оптического резонатора*, то нестабильность ( $\delta\nu$ ) частоты  $\nu$  генерации в большинстве случаев определяется изменением оптич. длины резонатора  $l$  ( $\delta\nu = \delta\nu/l$ ). Осн. источниками нестабильности  $l$  являются тепловая дрейф, механич. и акустич. возмущения элементов конструкции резонатора, флукуцации показателя преломления газоразрядной плазмы. С помощью оптич. репера система автоподстройки вырабатывает сигнал, пропорц. величине и знаку расстройки  $\Delta\nu$  между частотой  $\nu$  и частотой  $\nu_0$  центра спектральной линии, с помощью к-рого частота лазера настраивается на центр линии ( $\Delta\nu = \nu - \nu_0 = 0$ ). Относит. точность настройки обратно пропорц. произведению добротности спектральной линии  $\nu_0/\gamma$  ( $\gamma$  — ширина линии) на отношение сигнал/шум при её индикации.

Для получения узкой линии излучения и высокой кратковрем. стабильности частоты (стабильность за время  $t \leq 1$  с) необходимо использовать реперы достаточно высокой интенсивности с шириной  $\gamma$ , значительно превосходящей характерный диапазон частотных возмущений  $\Delta\nu_R$ . Для *газовых лазеров* характерная ширина спектра акустич. возмущений  $\Delta\nu_f \sim 10^2$ — $10^4$  Гц, поэтому требуемая ширина резонанса  $\gamma \leq 50$  Гц (относит. ширина  $10^{-2}$ — $10^{-4}$ ). Это позволяет использовать системы автоматич. подстройки частоты с широкой полосой ( $10^4$  Гц) для эфф. подавления быстрых флукуцаций длины резонатора.

Для достижения высокой долговрем. стабильности и воспроизводимости частоты необходимы оптич. линии высокой добротности, т. к. при этом уменьшаются влияющие факторы на сдвиги частоты центра линии.

**Оптические реперы.** Используемые в СВЧ-диапазоне методы получения узких спектральных линий оказались не применимыми в оптич. области спектра (доплеровское уширение мало в СВЧ-диапазоне). Для О. с. ч. важны методы, к-рые позволяют получать резонансы в центре спектральной линии. Это даёт возможность непосредственно связать частоту излучения с частотой квантового перехода. Перспективны три метода: метод намыленного поглощения, двухфотонного резонанса и метод разнесённых оптич. полей. Осн. результаты по стабилизации частоты лазеров получены с помощью метода насыщения и вогного поглощения, к-рый основан на величине взаимовлияния встречных световых волн с газом. Нелинейно поглощающая ячейка с газом низкого давления может находиться внутри резонатора лазера (активный репер) и вне его (пассивный репер). Из-за эффекта насыщения (выравнивание населённости уровней частиц газа в сильном поле) в центре доплеровск-уширенной линии поглощения возникает провал с однородной шириной, к-рая может быть в  $10^8$ — $10^9$  раз меньше доплеровской ширины. В случае внутренней поглощающей ячейки уменьшение поглощения в центре линии приводит к появлению узкого пика на контуре зависимости мощности от частоты генерации. Ширина величинной резонанса в молекулярном газе низкого давления определяется прежде всего столкновениями и эффектами, обусловленными конечным временем пролёта части-

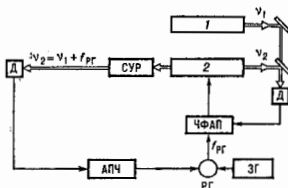


цы через световой пучок. Уменьшение ширины резонанса  $\gamma$  сопровождается режимом падением его интенсивности  $\Delta I$  (пропорци. кубу давления).

Наиб. узкие резонансы насыщенного поглощения с относит. шириной  $\leq 10^{-11}$  получены в  $\text{CH}_4$  на компонентах  $F_2^2$  и  $E$  колебательно-вращат. линий  $P$  (7) полосы  $\nu_2$  (см. *Молекулярные спектры*), к-рые близки к центру линии усиления гелий-неонового лазера на  $\lambda = 3,39$  мкм. Для точного совмещения линий усиления и поглощения используют  $^{22}\text{Ne}$  и увеличивают давление  $\text{He}$  в активной среде лазера либо помещают активную среду в магн. поле (для  $E$ -компоненты).

Схема О. с. ч., использующего сверхузкий резонанс (с относит. шириной  $10^{-11}$ — $10^{-12}$ ) в качестве репера, состоит из вспомогательного стабильного по частоте лазера 2 с узкой линией излучения, перестраиваемого лазера 1 с системы получения узкого резонанса (рис. 1). Узкая линия излучения перестраиваемого лазера, к-рый используется для получения сверхузкого

Рис. 1. Схема оптического стандарта частоты: ЧФАП — частотно-фазовый автоподстройщик; СУР — система получения сверхузкого резонанса; АПЧ — система автоматической подстройки частоты; ЗГ — звуковой генератор; РГ — радиогенератор; Д — фотодетектор.



резонанса, обеспечивается посредством фазовой синхронизации этого лазера со стабильным. Долговрем. стабильность перестраиваемого лазера достигается плавной настройкой его частоты на максимум сверхузкого резонанса с помощью зрительной системы автоподстройки. При этом возможно одновременно получать высокие значения кратковрем. и долговрем. стабильностей и воспроизводимости частоты.

Стабильность частоты. Наиб. высокая стабильность частоты получена в ИК-диапазоне с  $\text{He} - \text{Ne}$ -лазером ( $\lambda = 3,39$  мкм) с внутр. ячейкой поглощения. Т. к. абс. частота его известна с высокой точностью ( $10^{-11}$ ), то этот лазер может быть использован как самостоят. вторичный эталон частоты для измерения абс. частот в оптич. и ИК-диапазонах.

Ширина линии излучения такого лазера составляет  $0,07$  Гц (рис. 2). Стабильность частоты за времена усреднения  $\tau = 1$ — $100$  с

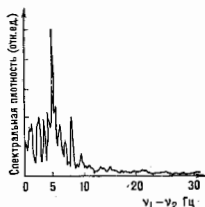


Рис. 2. Спектр линии частот двух независимых стабилизированных лазеров  $\text{He} - \text{Ne}/\text{CH}_4$ .

равна  $4 \cdot 10^{-15}$  (рис. 3). Долговрем. стабильность и воспроизводимость частоты  $\text{He} - \text{Ne}$ -лазеров с телескопич. расширением пучка, стабилизированных по резонансам в  $\text{CH}_4$  на линиях поглощения  $F_2^2$  и  $E$  (см. выше) с добротностью  $\sim 10^{11}$ , достигает  $\sim 10^{-14}$ . Приспичившим фактором, ограничивающим воспроизводимость и точность частоты, является квадратичный эффект Доплера.

Практич. интерес представляют О. с. ч. на основе  $\text{CO}_2$ -лазера с ищ. поглощающей ячейкой, заполненной парам  $^{182}\text{OsO}_4$ . Спектральная линия поглощения колебательно-вращат. перехода  $P(40)$  полосы  $\nu_2$  молекулы  $^{182}\text{OsO}_4$  совпадает с линией  $P(14)$  переименованной  $001 - 10^0$   $\text{CO}_2$ -лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм) и не имеет сверхтонкой структуры. Квадратичный эффект Доплера из-за боль-

шой массы этой молекулы мал. Стандарт  $\text{CO}_2/^{182}\text{OsO}_4$  имеет стабильность  $10^{-15}$  за время  $10$  с и воспроизводимость частоты  $10^{-15}$ . Для стабилизации частоты  $\text{CO}_2$ -лазера применяется также т. в. метод на сыв. в. н. флуоресценции, достоинством к-рого является возможность стабилизации на всех линиях генерации  $\text{CO}_2$ -лазера. Достигается стабильность частоты  $10^{-15}$  за время  $\tau = 50$  с.

В видимой области спектра используются  $\text{He} - \text{Ne}$ -лазеры ( $\lambda = 0,633$  мкм,  $0,612$  мкм), стабилизированные по резонансам насыщенного поглощения паров  $^{121}\text{I}_2$  и  $^{131}\text{I}_2$  на компонентах сверхтонкой структуры электронных переходов, к-рые используются в качестве оптич. стандарта длины волны для метрологич. измерений (см. *Метр*) и спектроскопич. исследований. Наиб. высокие значения стабильности частоты О. с. ч.  $\text{He} - \text{Ne}/^{121}\text{I}_2$  и  $\text{He} - \text{Ne}/^{131}\text{I}_2$  составляют  $1,9 \cdot 10^{-13}$  ( $\tau = 270$  с) и  $2 \cdot 10^{-13}$  ( $\tau = 100$  с). Воспроизводимость частоты этих лазеров достигает  $8 \cdot 10^{-13}$  и  $6 \cdot 10^{-13}$ .

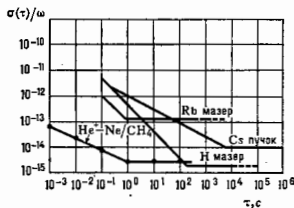


Рис. 3. Зависимость стабильности частоты от времени усреднения  $\tau$ .

Стабилизация частоты мощных волновых лазеров представляет интерес для развития техники перестраиваемых лазеров на кристаллах и лазеров на центрах окраски. В качестве оптич. репера используются узкие резонансы насыщенного флуоресценции в  $^{121}\text{I}_2$  шириной  $\sim 100$  кГц. Достигнута стабильность  $5 \cdot 10^{-14}$  при  $\tau = 100$  с и воспроизводимость частоты  $1,5 \cdot 10^{-12}$ .

Оптические часы. О. с. ч., снабженный системой деления его частоты в радиодиапазон, представляет собой устройство, позволяющее определять единицу шкалы времени — секунду — по числу периодов высокостабильных оптич. колебаний. Схема оптич. часов включает эталонный высокостабильный стандарт  $\text{He} - \text{Ne}/\text{CH}_4$ , цепочку подобранных и синхронизованных по фазе лазеров ИК-, субмиллиметрового диапазонов и генераторов СВЧ-диапазона, обеспечивающих деление оптич. частоты в радиодиапазон с выходом на стандартные частоты  $1$  и  $5$  МГц. Последоват. фазовый захват частоты одного генератора к другому (см. *Захватывание частоты*) позволяет передавать высокую стабильность частоты О. с. ч. в радиодиапазон без потерь. В качестве быстродействующих нелинейных элементов для преобразования частот лазеров и генерации гармоник высокого порядка применяются точечные диоды типа металл — оксид — металл (МОМ-диод) с постоянной времени  $\sim 10^{-14}$  с. Пока система деления частоты  $\text{He} - \text{Ne}/\text{CH}_4$  стандарта является громоздкой. Необходимо ее упрощение, чтобы О. с. ч. стали конкурентноспособными со стандартами радиодиапазона.

Абсолютное измерение частот. Для измерения частот оптич. диапазона необходимо осуществлять умножение известной частоты стандарта радиодиапазона в  $10^4$ — $10^9$  раз или деление измеряемой частоты лазера в такое же число раз. Длит. время абс. измерения частот лазеров проводилось поэтапно. Сначала определялись частоты лазеров дальнего ИК-диапазона сравнением упомянутого сигнала от СВЧ-стандарта с частотой лазера. Затем известная частота лазера снова умножалась

и сравнивался с частотой нового лазера. Схема синтеза частоты на каждом этапе измерения выражается ф-лой  $\nu_i = \nu_{i-1} \pm \nu_{пр}$ , где  $\nu_i$  — синтезируемая частота,  $\nu_{i-1}$  — известная частота,  $\nu_{пр}$  — измеряемая промежуточная частота. При известном коэф. умножения частоты ( $n$ ) определяется абс. значение  $\nu_i$ . Создание оптич. шкалы времени открыло возможность измерения абс. частот лазеров с предельной точностью  $10^{-13}$ — $10^{-14}$ .

Наиб. точно измерена частота лазера He — Ne( $CH_4$ ) ( $\lambda = 3,39$  мкм). Этот лазер имеет высокую воспроизводимость частоты и занимает удобное промежуточное положение между субмиллиметровой и ИК-областью, с одной стороны, и ближней ИК-областью и видимой — с другой. Ср. значение частоты (вычисленное Д. Найтом (D. Knight))  $\nu_{CH_4} = 86276181602,3 \pm 0,8$  кГц.

Улучшение характеристик О. с. с. связано с дальнейшим развитием метода насыщающего поглощения, а также методов, основанных на применении раванесивных оптич. полей, двухфотонных резонансов и резонансов поглощения захваченными в ловушки частицами. В сочетании с охлаждением частиц они формируют резонансы с облачностью  $\sim 10^{14}$  и позволяют получить стабильность и воспроизводимость частоты на уровне  $\geq 10^{-14}$  (см. *Нейманская спектроскопия*), см. Лит.: Бабан Н. Г., Честнов В. С., Оптические стандарты частот, «УФН», 1968, т. 96, с. 585; Jennings D. A., Peterson F. R., Evenson K. M., Direct frequency measurement of the 260 THz (1.154  $\mu$ m) He Laser and beyond, in: *Laser spectroscopy*, IV, Proc. 4. Int. Conf., Bochum-Essen, Fed. Rep. of Germany, June 11—15 1979, ed. by H. Walther, K. W. Kothe, В.—[a. o.], 1979, p. 39; Proceedings of Third Symposium on Freq. Standards and Metrology, Aussois, France, 12—15 Oct. 1981, ed. Phys., 1981, т. 42, Сбод. С. 8, 38, 12; В а г а н а — Ч е б о т а е в В. П., Лазерные стандарты частоты, «УФН», 1986, т. 148, с. 143; Knight D. J. E., A tabulation of absolute laser — frequency measurements, «Metrologia», 1986, т. 23, с. 251.

**ОПТИЧЕСКИЙ ЗАТВОР** — устройство для управления световым потоком — временного перекрытия и последующего пропускания в течение определ. промежутка времени. Существует несколько широко используемых типов О. з.: механич., эл.-оптич., магн.-оптич. скенне, фотонные.

В механических О. з. перекрывание светового пучка осуществляется механич. перемещением шторок, зеркал, прием и т. п., поэтому скорость переключения таких О. з. определяется инерцией подвижных элементов и составляет обычно не менее  $10^{-4}$  с.

Действие электрооптического затвора основано на использовании линейного (Поккельса эффект) или квадратичного (Керра эффект) эл.-опт. эффекта — зависимости двулучепреломления среды от напряженности приложенного к ней эл. поля. Такой О. з. состоит из эл.-опт. ячейки, помещенной между двумя параллельными (или скрещенными) поляризаторами. Управление затвором осуществляется обычно подачей на эл.-опт. ячейку т. к. полуовольного напряжения — напряжения, при к-ром возникающее в среде двойное лучепреломление приводит к сдвигу фаз между обмыкновеной и необмыкновеной волнами на величину  $\pi$ . В технике измерений сверхкоротких лазерных импульсов для управления эл.-опт. затвором вместо электр. импульсов используются мощные полиризов. световые импульсы (затвор Доуге и Хагенса), к-рые, распространившись в ячейке Керра, приводят вследствие величины среды к возникновению оптич. эффекта двулучепреломления. Скорость переключения таких О. з. очень высока (до  $10^{13}$  с).

Действие магнитооптического затвора основано на линейном магн.-опт. эффекте (Фарадея эффект) — зависимости магн. поворота плоскости поляризации света, распространяющегося в среде, от напряженности магн. поля, приложенного к ней. О. з. содержит ячейку Фарадея (опт. среда с большой Верде постоянной, входящая в магн. поле соленоида), к-рая установлена между двумя скрещенными поляризаторами. Управление затвором осуществляется изменением тока соленоида. Важным свойством, от-

личающим магн.-опт. затвор от других, является его независимость: будучи открытым для пучка излучения, проходящего затвор в прямом направлении, затвор закрыт для пучка, идущего в обратном направлении (см. *Независимые элементы*), что позволяет использовать его в качестве оптич. изолятора.

Фототронный (насыивный) затвор применяется для модуляции добротности резонатора лазеров и для получения режима самосинхронизации мод в лазере. Действие его основано на явлении насыщения поглощения (просветления) среды при воздействии на ней интенсивного оптич. излучения (см. *Насычивающий эффект*). Быстродействие фототронных О. з. определяется свойствами используемой среды (стекла, красители и др.) и составляет  $10^{-10}$ — $10^{-13}$  с.

О. в. используется в фотоаппаратах, кинокамерах, скоростных фоторегистрирующих устройствах, для модуляции интенсивности оптич. пучков, в лазерных устройствах.

Лит.: Мустель Е. Р., Парыгин В. Н., Методы модуляции и сканирования света, М., 1976; Справочник по лазерам, пер. с англ., под ред. А. М. Прокурова, т. 2, М., 1978; Сверхкороткие световые импульсы, пер. с англ., под ред. С. Шапиро, М., 1981.

**ОПТИЧЕСКИЙ КВАНТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР** — см. Лазер.

**ОПТИЧЕСКИЙ КОНТАКТ** — контактное соединение двух поверхностей твердых тел, тщательно отполированных и сближенных на расстояние, равное нормальной длине световой волны (порядка  $\lambda$ ). О. к. в нормальных условиях (на воздухе) приводит к высокопрочному соединению твердых тел, обусловленному гл. обр. силами межмолекулярного взаимодействия (водородная связь), возникающим между адсорбированными из воздуха на поверхности контактирующих тел молекулами воды и углеводородов.

Геом. толщина О. к. зависит от качества обработки соединяемых поверхностей и не является пост. величиной в пределах всей контактирующей поверхности. Эфф. геом. толщина определяется как сумма ср. значений высот микронеровностей обеих контактирующих поверхностей. В качестве приближения за эфф. толщину может быть принято ср. значение толщин слоев молекул воды и углеводородов, адсорбированных в О. к. Толщины слоев воды и углеводородов в О. к. в нормальных условиях зависят от технол. факторов приготовления поверхностей, высот микронеровностей контактирующей пары и составляют ок. 1—2 и 4—10 нм соответственно.

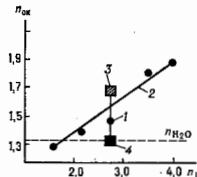
Прочностные свойства О. к. определяются силами сцепления, действующими между контактирующими поверхностями. Различают нормальную составляющую  $\sigma$ , определяющую прочность О. к. на разрыв, и тангенциальную составляющую  $\tau$ , определяющую прочность на сдвиг. Для типичной пары поверхностей, изготовленных из кварцевого стекла и находящихся в О. к., ср. значения величин  $\sigma$  и  $\tau$  равны 60 Н/см<sup>2</sup> и 40 Н/см<sup>2</sup> соответственно. О. к. достаточно стабильно по механич. свойствам. Во в течение времени параметры  $\sigma$  и  $\tau$  имеют тенденцию к небольшому увеличению, предельная величина к-рого зависит от материала контактирующей пары и качества полировки. После вакуумирования О. к. и последующего пребывания его в атмосфере с высокой относит. влажностью увеличивается прочность на разрыв  $\sigma$  и резко ( $\sim$  в 3 раза) снижается сдвиговая прочность  $\tau$ , что связано с появлением тонкой прослойки воды, образовавшейся между контактирующими поверхностями в результате капиллярного всасывания. Удаляя молекулы углеводородов с поверхности твердых тел и शुष्ривая воздух на контактный слой, можно дополнительно увеличить прочность О. к. ( $\sim$  в 2 раза).

В условиях вакуума, когда с поверхности соединяемых твердых тел удалены адсорбиров. молекулы, прочность О. к. определяется ван-дер-ваальсовыми силами, обусловленными перекрытием флукуационного

ал.-магн. поля в отд. зонах О. к. (см. *Межмолекулярное взаимодействие*). Для этого случая сила связи взаимодействующих тел определяется через диэлектрич. проницаемости веществ, образующих О. к., и веществ, находящихся в зазоре; причём сила сцепления уменьшается пропорц. кубу расстояния между контактирующими поверхностями.

Оптич. свойства О. к. (отражение, преломление) определяются оптич. свойствами контактирующих тел, кол-вом воды в слое и могут значительно меняться в пределах контакта; напр., коэф. отражения О. к. для пар кварцевых пластин меняется в пределах  $10^{-4} - 10^{-7}$ . Показатель преломления О. к. может быть получен в аддитивном приближении с помощью Лоренца — Лоренца ф-лы, исходя из показателей преломления контактирующих тел, состава адсорбированных в О. к. воды, углеводородов и т.д. Относит. соотношение высот макрорельефов поверхностей. На рис. представлена зависимость показателя преломления О. к.  $n_{\text{оп}}$  от показателя преломления  $n_1$  одной из контактирующих пластин. Измерение  $n_{\text{оп}}$  проводится методами *нарушенного полного внутреннего отражения*, а изменение  $n_1$

Зависимость показателя преломления оптического контакта  $n_{\text{оп}}$  от величины показателя преломления  $n_1$  одной из контактирующих пластин: 1 — асимптотические точки; 2 — теоретическая кривая (аддитивное приближение); 3 — через 2 часа после вакуумирования; 4 — с последующей 5-минутной выдержкой при 100% относительной влажности.



обеспечивается набором призм из разных материалов; вторая пластина — кварц ( $n_2 = 1,457$ ) — не меняется.

При неравномерном нагревании О. к. легко разрушается, что используется в технологии оптич. приборостроения для оперативной разборки (сборки) высокопрочного соединения деталей с подложкой. Важной разновидностью О. к. является глубокий О. к., получаемый при высокотемпературном спекании специально обработанных поверхностей. Прочность такого О. к., применяемого для неразъемного соединения деталей, сравнима с макросопч. прочностью контактирующих тел.

О. к. применяется для устранения отражения и рассеяния света от поверхности раздела сред, а также для получения высокопрочных разъемных и неразъемных соединений в оптич. технологии.

Лит.: О. Бреймов И. В., Тресков Е. С., Оптический контакт полированных стеклянных поверхностей, «ЖТФ», 1957, т. 32, в. 2, с. 185; Дерягин Е. В., Кротова Н. А., Смет и г. В. П., Агеева твердых тел, М., 1977; Золотарев В. М. и др., Исследование механизма контактного взаимодействия плоских поверхностей диэлектриков, «ФТТ», 1978, т. 20, № 1, с. 177. В. М. Золотарев.

**ОПТИЧЕСКИЙ ПИРОМЕТР** — см. *Пирометрия оптическая*.

**ОПТИЧЕСКИЙ ПРОВОЙ** — см. в ст. *Оптические разряды*.

**ОПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР** — совокупность неск. отражающих элементов, образующих *открытый резонатор* (в отличие от закрытых объемных резонаторов, применяемых в диапазоне СВЧ). Для длин волн  $\lambda < 0,1$  см использование закрытых резонаторов, имеющих размеры  $d \sim \lambda$ , затруднительно из-за малости  $d$  и больших потерь энергии в стенках. Использование же объемных резонаторов с  $d > \lambda$  также невозможно из-за возбуждения в них большого числа собств. колебаний, близких по частоте, в результате чего резонансные линии перекрываются и резонансные свойства практически исчезают. В О. р. отражающие элементы не образуют замкнутой полости, поэтому большая часть его собств. колебаний сильно затухает и

лишь малая часть их затухает слабо. В результате спектр образованного О. р. сильно разрежен.

О. р. — резонансная система *лазера*, определяющая спектральный и модовый состав лазерного излучения, а также его направленность и поляризацію. От О. р. зависит заполненность активной среды лазера полем излучения и, следовательно, снимаемая с нее мощность излучения и кнд лазера.

Простейшим О. р. является *интерферометр Фабри—Перо*, состоящий из двух плоских параллельных зеркал. Если между зеркалами, расположенными на расстоянии  $d$  друг от друга, нормально к ним распространяется плоская волна, то в результате отражения её от зеркал в пространстве между ними образуются стоячие волны (собств. колебания). Условие их образования  $d = q\lambda/2$ , где  $q$  — число полуволн, укладываемых между зеркалами, наз. продольным индексом колебания (обычно  $q \sim 10^4 - 10^8$ ). Собств. частоты О. р. образуют арифметич. прогрессию с разностью  $c/2d$  (эквидистантный спектр). В действительности из-за дифракции на краях зеркал поле колебаний зависит и от поперечных координат, а колебания характеризуются также поперечными индексами  $m, l$ , определяющими число оборотов поля в 0 при изменении поперечных координат. Чем больше  $m$  и  $l$ , тем выше затухание колебаний, обусловленное излучением в пространстве (вследствие дифракции света на краях зеркал). Моды с  $m = n = 0$  наз. продольными, остальные — поперечными.

Т. к. коэф. затухания колебания растут с увеличением  $m$  и  $l$  быстрее, чем частотный интервал между соседними колебаниями, то резонансные кривые, отвечающие большему  $m$  и  $l$ , перекрываются и соответствующие колебания не проявляются. Коэф. затухания зависит также от числа  $N$  зон Френеля, видимых на зеркале диам.  $R$  из центра др. зеркала, находящегося от первого на расстоянии  $d$ :  $N = R^2/2d\lambda$  (см. *Френелевы зоны*). При  $N \sim 1$  остается 1—2 колебания, сопутствующих осн. колебанию ( $q = 1$ ).

Двухзеркальные резонаторы. О. р. с плоскими зеркалами чувствительны к деформациям и перекосам зеркал, что ограничивает их применение. Этого недостатка лишены О. р. со сферич. зеркалами (рис. 1), в к-рых лучи, неоднократно отражаясь от вогнутых зеркал, не выходят за пределы отгибавшей поверхности — *каустики*. Поскольку волновое поле быстро убывает вне каустик, излучение из сферич. О. р. с каустикой гораздо меньше, чем излучение из плоского О. р. Разрежение спектра в этом случае реализуется благодаря тому, что размеры каустик растут с ростом  $m$  и  $l$ . Для колебаний с большими  $m$  и  $l$  каустика оказывается расположенной вблизи края зеркал или вовсе не формируется. Сферич. О. р. с каустикой наз. устойчивыми, т. к. параксимальный луч при отражении не уходит из присоединенной области (рис. 2, а). Устойчивые О. р. нечувствительны к небольшим смещениям и перекосам зеркал, они применяются в активных средах, обладающих небольшим усилением ( $\leq 10\%$  на один проход).

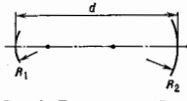
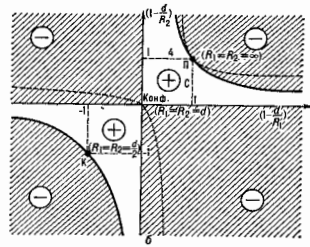


Рис. 1. Двухзеркальный резонатор.

Для сред с большим усилением используются неустойчивые О. р. в к-рых каустика образоваться не может; луч, проходящий вблизи осн. резонатора под малым углом к ней, после отражений неограниченно удаляется от осн. На рис. 2(б) дана диаграмма устойчивости О. р. при разл. соотношениях между радиусами  $R_1$  и  $R_2$  зеркал и расстоянием  $d$  между ними. Неастрихованные области соответствуют наличию каустик, заштрихованные — их отсутствию. Точки, соответствующие резонатору с плоскими (П) и концентрическими (К) зеркалами, лежат на границе заштрихованных областей. На границе между устойчивыми и неустой-

чивыми О. р. расположен также конфокальный О. р. ( $R_1 = R_2 = d$ ). Из устойчивых О. р. наиб. часто используется полуофокальный О. р.  $R_1 \approx R_2 = 2d$ , из неустойчивых — телескопический О. р. ( $R_1 + R_2 = 2d$ ). Потери на излучение в неустойчивых О. р. для

рис. 2. Образование каустыни (а) и диаграмма устойчивости двухзеркальных резонаторов (б); знаком плюс отмечены области устойчивости; знаком минус — области неустойчивости; сплошные линии — границы этих



областей; П — резонатор с плоскими зеркалами; Конф. — конфокальный резонатор; К — концентрерский резонатор; пунктир — даны телескопических резонаторов.

колебаний высших типов значительно больше, чем для осн. колебания. Это позволяет добиться одноводовой генерации лазера и связанной с ней высокой направленности излучения.

**Теория.** Распределение электрич. поля  $E$  устойчивого О. р. в плоскости, перпендикулярной оси О. р. (z), описывается выражением

$$E(x, y) = E_0 H_m(x/W) H_n(y/W) \exp[-(x^2 + y^2)/2W^2]. \quad (1)$$

Здесь  $E_0$  — коэф., определяющий амплитуду поля;  $H_{m,n}$  — полиномы Эрмита (см. *Ортогональные полиномы*)  $m$ -й и  $n$ -й степеней:  $H_0(x) = 1$ ;  $H_1(x) = 2x$ ;  $H_2(x) = 4x^2 - 2$ ;  $H_3(x) = 8x^3 - 12x$ ;  $W$  — поперечный радиус продольной моды (на расстоянии от оси О. р., равном  $W$ , плотность энергии продольной моды уменьшается в  $e$  раз). Зависимость  $W(z)$  имеет вид

$$W = \sqrt{W_0^2 + z^2/k^2 W_0^2},$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ , а  $z$  отсчитывается от т. н. перетяжки продольной моды, т. е. от той точки на оси резонатора, где её радиус имеет наим. значение, равное  $W_0$  (рис. 2, а). Расстояние от перетяжки до зеркала  $R_1$

$$d_1 = \frac{d(R_1 - d)}{R_1 + R_2 - 2d},$$

радиус продольной моды в перетяжке

$$W_0 = \sqrt{\frac{d(R_1 - d)(R_2 - d)(R_1 + R_2 - d)}{k(R_1 + R_2 - 2d)}}.$$

Частотный спектр двухзеркального О. р. задаётся условием

$$v_{m,n,q}(\Gamma z) = \frac{c}{2d} \left[ q + (m+n+1) \frac{c}{2\pi} \arccos \sqrt{1 - d/R_1} (1 - d/R_2) \right]. \quad (2)$$

Распределение поля на зеркале показано на рис. 3. Т. к. частотный спектр двухзеркального О. р. вырож-

ден (зависит лишь от суммы  $m+n$ , но не от каждого из индексов в отдельности), то  $E(x, y)$  может отличаться от (1). Конкретный вид распределения зависит от слабых возмущающих действий со стороны диафрагм или др. объектов в области, занимаемой пучком. В част-

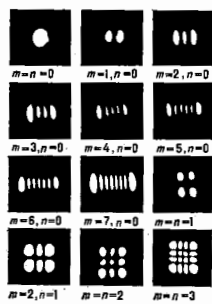


рис. 3. Распределение поля на зеркале при прямоугольной симметрии.

рис. 4. Распределение поля на зеркале при осевой симметрии; \* соответствует распределению поля при сложении двух ортогонально поляризованных мод.

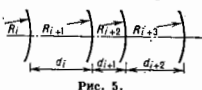
ности, при осевой симметрии возможны распределения полей (рис. 4), описываемые в цилиндрич. координатах ( $r, \varphi, z$ ) выражением

$$E(r, \varphi) = E_0 (r/W) L_p^l(r^2/W^2) \exp(-r^2/2W^2) \left\{ \frac{\sin}{\cos} \right\} l\varphi.$$

Здесь  $l, p$  — индексы колебания, определяющие число обращений поля в 0 при изменении  $r$  и  $\varphi$ ;  $W(z)$  — радиус продольной моды;  $L_p^l(x)$  — обобщённый полином Лагерра:  $L_0^0 = 1$ ;  $L_1^0 = l + 1 - x$ ;  $L_1^1 = \frac{1}{2}(l+1)(l+2) - (l+2)x + \frac{1}{2}x^2$ ; ...

Спектр О. р. при осевой симметрии определяется соотношением (2), где  $(m+n+1)$  следует заменить на  $(2p+l+1)$ .

**Составной резонатор.** Кроме зеркал О. р. часто содержит т. н. активные элементы (пластинки, линзы и др.). Составной О. р. может работать в двух режимах в зависимости от того, используется или теряется излучение, отражённое от промежуточных поверхностей. Если отражённое излучение используется, то О. р. наз. согласованным. Каждая часть согласованного О. р., заключённая между двумя соседними поверхностями раздела, может рассматриваться как от. резонатор, причём поперечные моды этих резонаторов подбирают так, чтобы они совпадали на границах раздела. Условие согласования (рис. 5) имеет вид



$$\frac{R_{i+1} - d_{i+1}}{2d_{i+1} - R_{i+1} + R_{i+2}} = \frac{(R_i + d_i)d_i}{2d_i - R_{i+1} + R_i}.$$

Согласованный О. р. обладает неэквидистантным спектром и может быть использован для разрежения продольного спектра О. р. (см. ниже).

Важной проблемой в случае составного О. р. является эфф. заполнение активной среды лазера полем выбранной моды. Если составной О. р. обладает осью или плоскостью симметрии, то продольная мода (как и у двухзеркального О. р.) является гауссовым пучком (см. *Квазиоптика*). Его прохождение через оптич. элементы описывается матрицами этих элементов (см. *Матричные методы в оптике*), а прохождение через О. р. описывается матрицей, являющейся произведением матриц составляющих его оптич. элементов. При

этом комплексный параметр гауссова пучка  $q$  определяется ур-нием

$$Cq^2 + (D - A)q - B = 0.$$

Коэф.  $A, B, C, D$  образуют матрицу  $O. p.$  Это ур-ние, а также соотношения  $R = [Rc(v/g)]^{-1}$ ,  $\omega^2 = [k/m(v/g)]^{-1}$  позволяют определять поперечный радиус пучка  $\omega$  и радиус кривизны волнового фронта  $R$  в любом сечении резонатора.

Селекция продольных мод. Для разрежения (селекции) продольных мод, имеющих одинаковое поперечное распределение поля, но отличающихся частотой, используются резонаторы, содержащие дисперсионные элементы (призмы, дифракц. решётки, интерферометры и др.). В частности, в качестве дисперсионного элемента применяют доплит.  $O. p.$ , связанные с основными и образующие т. н. эквивалентное зеркало, коэф. отражения  $k$ -рого  $r$  зависит от частоты  $\nu$ . Для удаления из спектра одной из продольных мод наиб. пригоден линейный трёхзеркальный  $O. p.$  (рис. 6,а), для выделения в спектре одной продольной моды — резонатор Фокса — Смита (рис. 6,б) и Т-образный (рис. 6,в). В нек-рых случаях удобен  $O. p.$  Майкельсона (рис. 6,з).

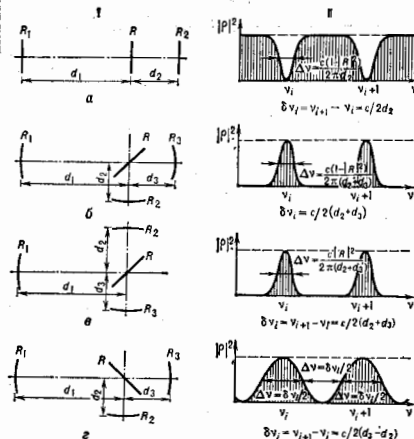


Рис. 6. Различные типы связанных резонаторов (I) и зависимость коэффициента отражения эквивалентного зеркала  $r$  от частоты  $\nu$  (II).

В лазерах на кристаллах применяется комбинация дифракц. решётки и интерферометра Фабри — Перо (рис. 7). При этом интерферометр выделяет одну продольную моду, а решётка предотвращает генерацию на др. порядках интерферометра. Линзы  $L_1$  и  $L_2$ , образующие т. н. телескоп, согласуют узкий пучок, проходящий через активную среду  $A$ , с широким пучком, попадающим на интерферометр и решётку. Активная среда в таком  $O. p.$  играет также роль диафрагмы.

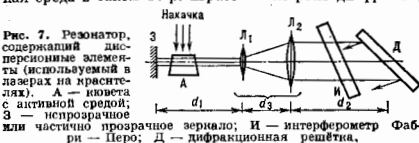


Рис. 7. Резонатор, содержащий дисперсионные элементы (используемый в лазерах на кристаллах).  $A$  — кристалл с активной средой;  $L_1$  — линза;  $L_2$  — линза;  $I$  — интерферометр Фабри — Перо;  $D$  — дифракционная решётка.

выделяющей оси, поперечную моду. Такие  $O. p.$  позволяют создать перестраиваемые в широком диапазоне одночастотные лазеры на кристаллах.

Селекция поперечных мод основана на различии в распределении полей поперечных мод с разными  $m$  и  $n$ . Т. к. обычно требуется выделить ось, моду, к-рая имеет мин. угл. расходимость, гауссово распределение и мин. протяжённость в поперечном направлении, то применяется диафрагмирование пучка внутри  $O. p.$  Радиус диафрагмы ориентировочно должен быть равен поперечному радиусу моды, следующей за основной. При этом потери всех мод, кроме основной, сильно увеличиваются.

При селекции поперечных мод необходимо, чтобы оставшаяся единств. мода эффективно заполняла активную среду. Поэтому важны границы зон устойчивости (рис. 2,б), где поперечные размеры мод увеличиваются: 1) радиус моды увеличивается во всём объёме, если расстояние  $d$  между зеркалами постоянно, а радиусом кривизны зеркал  $R_1$  и  $R_2 \rightarrow \infty$  (при этом сильно увеличивается чувствительность резонатора к разности-росткам); 2) радиус моды увеличивается на 1-м зеркале и уменьшается на 2-м, если  $d \lesssim R_1$  ( $R_2 > R_1$ ); 3) радиус моды увеличивается на 2-м зеркале и уменьшается на 1-м, если  $d \lesssim R_2$ ; 4) радиус моды увеличивается на обоих зеркалах и уменьшается в области их центров кривизны, если  $d \lesssim (R_1 + R_2)$ .

При необходимости выделения к.-л. высшей моды на нулевой линии распределения поля этой моды помещают тонкую рассеивающую вить, к-рая не оказывает влияния на избранную моду и подавляет др. моды, не обращающиеся в 0 на этой линии.

Резонаторы с анизотропными элементами. Поляризация лазерного излучения определяется т. н. анизотропными элементами, находящимися в  $O. p.$  Такими элементами являются двулучепреломляющие пластины, поляризаторы, вещества, обладающие оптической активностью, и др., а также пластины Брюстера и диэлектрич. зеркала при наклонном падении на них излучения. Определение поляризации производится матричным методом Джонса. При этом поляризац. матрица всего  $O. p.$  является произведением матриц входящих в него элементов, расположенных в том порядке, в к-ром через эти элементы проходит излучение начиная с того места, где требуется определить состояние поляризации. Собств. векторы поляризац. матрицы являются векторами Джонса  $E(E_x, E_y)$  полей, генерируемых в  $O. p.$  Степень поляризации  $\epsilon$  и направление гл. осей эллипса поляризации  $\alpha$  определяются соотношениями

$$\epsilon = \text{tg} \left[ \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{2R}{1+R} \sin^2 \xi \right) \right],$$

$$\sin 2\alpha = 2R \cos^2 \xi [(1-R)^2 + 4R^2 \cos^2 \xi]^{-1/4},$$

$$\cos 2\alpha = (1-R^2) [(1-R)^2 + 4R^2 \cos^2 \xi]^{-1/4},$$

где  $R = |E_x|/|E_y|$ ,  $\xi = \arctg(E_y/E_x)$ .

Модули собств. значений матрицы Джонса определяют потери  $O. p.$ , обусловленные поляризаторами, а фазы собств. значений — поляризац. поправки к частотам соответствующих мод. Подбирая анизотропные элементы, можно добиться требуемого состояния поляризации. Учитывая, что обычно анизотропные элементы обладают заметной дисперсией, можно использовать их также для разрежения продольного спектра.

Кольцевые резонаторы. Спектр собств. частот кольцевого  $O. p.$ , образованного тремя одинаковыми

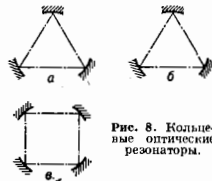


Рис. 8. Кольцевые оптические резонаторы.

сферич. зеркалами радиуса  $R$ , расположенными в вершинах равностороннего треугольника со стороной  $a$  (рис. 8), определяется соотношением

$$v = \frac{c}{a} \left[ \frac{1}{6}(2q - n) + \frac{n + 1/2}{2\pi} \arccos \left( 1 - \frac{2a}{R\sqrt{3}} \right) + \frac{m + 1/2}{2\pi} \arccos \left( 1 + \frac{a\sqrt{3}}{2R} \right) \right]$$

Перетяжки мод находятся на серединах сторон треугольника; поперечные протяженности мод в области перетяжки в плоскости осевого контура равны:

$$2a_n = 2\sqrt{\frac{2n+1}{2k} \sqrt{a(\sqrt{3}R - a)}};$$

$$2a_m = 2\sqrt{\frac{2m+1}{2k} \sqrt{a\left(\frac{4R}{\sqrt{3}} - a\right)}}.$$

Если у резонатора лишь одно зеркало сферическое, а два плоских (рис. 8,б), то его спектр определяется соотношением

$$v = \frac{c}{a} \left[ \frac{1}{6}(2q - n) + \frac{n + 1/2}{6\pi} \arccos \left( 1 - \frac{2a\sqrt{3}}{R} \right) + \frac{m + 1/2}{6\pi} \arccos \left( 1 - \frac{\sqrt{3}a}{2R} \right) \right]$$

Поперечные протяженности мод в области перетяжки, к-рая находится на середине стороны треугольника, противолежащей сферич. зеркалу в плоскости резонатора, равны:

$$2a_n = 2\sqrt{\frac{2n+1}{2k} \sqrt{3a(R\sqrt{3} - 3a)}};$$

$$2a_m = 2\sqrt{\frac{2m+1}{2k} \sqrt{a(4R\sqrt{3} - 9a)}}.$$

Оптич. система, образующая О. р. с неплоским контуром, напр. система из 4 зеркал, расположенных в вершинах тетраэдра (рис. 8,а), характеризуется тем, что изображение того или иного предмета, построенное с помощью этой системы, повернуто относительно самого предмета на нек-рый свойственный этой системе угол. Для тетраэдра этот угол равен  $\varphi = \sum \varphi_i$ , где  $\varphi_i$  — углы между соседними плоскостями падения лучей на зеркала (границ тетраэдра), к-рые отсчитываются так, что тетраэдр лежит внутри угла. Продольной модой О. р. с неплоским контуром является пучок, у к-рого гл. ось эллиптич. амплитудного распределения развернута на нек-рый угол относительно гл. линий кривизны волнового фронта. Благодаря этому амплитудное распределение при распространении пучка в свободном пространстве испытывает поворот, к-рый компенсирует поворот, обусловленный обычным расположением зеркал. Кольцевые О. р. с неплоским контуром применяются, напр., в *лазерных гироскопах*. Они позволяют, в частности, избавиться от анизотропии, свойственной кольцевым О. р. с плоским контуром.

Неустойчивые резонаторы обладают высокими потерями на излучение во внеш. пространство (см. выше). Потери возрастают с увеличением  $m$  и  $n$ , благодаря этому неустойчивые О. р. обеспечивают одностороннюю (по  $m$  и  $n$ ) генерацию. Достоинством неустойчивых О. р. является большая поперечная протяженность осн. моды, вследствие чего они могут быть использованы с активными средами большого поперечного сечения. Вывод энергии из неустойчивого О. р., как правило, осуществляется не сквозь зеркала, как в устойчивых О. р., а за краями одного из зеркал. В неустойчивых О. р. существенную (отрицат.) роль играет волна, отраженная от края зеркала и сходящаяся к осн О. р. Для уменьшения такого отражения применяют

сглаживание края зеркала, к-рому придаётся звездообразная форма, скругляются края и т. п.

Осн. мода неустойчивого О. р. образована двумя сферич. волнами, распространяющимися между зеркалами навстречу друг другу. В случае телескопич. неустойчивого О. р. (рис. 9) одна из волн может быть плоской. Центр сферич. волны лежит на расстоянии  $x = R_1/2$  за выпуклым зеркалом с радиусом кривизны  $R_1$ . Выгнутое зеркало должно обладать при этом радиусом кривизны  $|R_2| = R_2 + 2d$  ( $R_1 < 0$ ). При достаточн. больших поперечных размерах 1-го зеркала пучок излучения кольцевой формы выводится в сторону выпуклого зеркала с волновым фронтом, близким к плоскому.

Неустойчивые О. р. с вращением поля образуются дефокусирующей системой зеркал, расположенных в вершинах неплоского многоугольника. Однако наиб. важными О. р., образуемые двумя двугранными угловыми отражателями (рис. 10), ребра к-рых развернуты друг относительно друга на угол  $\beta$ . Если одна или нек-рая поверхность отражателей являются выпуклыми, то О. р. не-

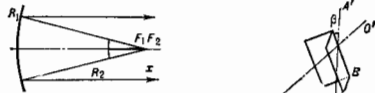


Рис. 9. Неустойчивый телескопический резонатор.

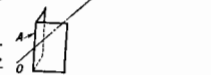
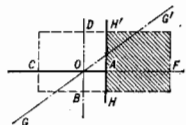


Рис. 10. Линейный резонатор с вращением поля, образованный угловыми отражателями.

устойчив. Поле при полном обороте такого резонатора испытывает поворот на угол  $\alpha = 2\beta$ . Достоинством неустойчивого О. р. с вращением поля является воз-

можность вывода энергии в виде компактного осевого пучка из неустойчивого резонатора с вращением поля на  $\alpha = \pi/2$ ; AC — ребро углового отражателя зеркала, вдоль которого выводится пучок излучения (заптрихован), HH' — обрз того же зеркала, GG' — ребро второго углового отражателя.



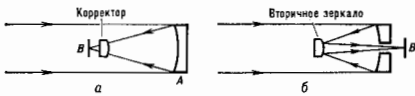
можность вывода излучения в виде не кольцевого пучка, как в обычном неустойчивом О. р., а осевого компактного пучка (рис. 11).

Лит.: Вайнштейн Л. А., Открытые резонаторы и открытые волноводы, М., 1966; Аваньян В. Ю. А., Оптические резонаторы и проблема расхождений лазерного излучения, М., 1979; Справочник по лазерам, пер. с англ., под ред. А. М. Прохорова, т. 2, М., 1978, гл. 22, 23; Карлов Н. В., Лекции по квантовой электронике, 2 изд., М., 1988.

**ОПТИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП** — применяется для получения изображений и спектров космич. объектов в оптич. диапазоне. Излучение объектов регистрируется при помощи фотогр. или телевиз. камер, *электронно-оптических преобразователей, приборов с зарядовой связью*. Эффективностью О. т. характеризуется предельной *звездной величиной*, достижимой на данном телескопе при заданном отношении сигнала к шуму (точности). Для слабых точечных объектов, когда шум определяется фоном ночного неба, она зависит в осн. от отношения  $D/\beta$ , где  $D$  — размер апертуры О. т.,  $\beta$  — угл. диаметр даваемого им изображения (чем больше  $D/\beta$ , тем больше, при прочих равных условиях, предельная звездная величина). Работющий в оптич. условиях О. т. с зеркалом diam. 3,6 м имеет предельную звездную величину ок. 26<sup>m</sup> при точности 30%. Принципиальных ограничений предельной звездной величины наземных О. т. не существует.

Астр. О. т. изобретён Г. Галилеем (G. Galilei) в нач. 17 в. (хотя, возможно, у него были предшественники). Его О. т. имел рассеивающий (отрицательный) окуляр. Прибл. в это же время И. Кеплер (J. Kepler) предложил О. т. с положит. окуляром, позволяющим установить в нём крест нитей, что значительно повысило точность визирования. На протяжении 17 в. астрономы пользовались О. т. подобного типа с объективом, состоящим из одной плоско-выпуклой линзы. С помощью этих О. т. изучалась поверхность Солнца (пятна, факелы), картографировалась Луна, открыты спутники Юпитера, кольца и спутники Сатурна. Во 2-й пол. 17 в. И. Ньютон (I. Newton) предложил и изготовил О. т. с объективом в виде металла, параболич. зеркала (рефлектор). С помощью подобного О. т. У. Гершелем (W. Herschel) открыт Уран. Прогресс стекловарения и теории оптич. систем позволил создать в нач. 19 в. ахроматич. объективы (см. Ахромат). О. т. с их использованием (рефракторы) обладали сравнительно небольшой длиной и давали хорошее изображение. С помощью таких О. т. были измерены расстояния до ближайших звёзд. Подобные инструменты применяются и в наше время. Создание очень большого (с объективом diam. более 1 м) линзового рефлектора оказалось невозможным из-за деформации объектива под действием собств. веса. Поэтому в кон. 19 в. появились первые усовершенствованные рефлекторы, объектив к-рых представлял собой изготовленное из стекла вогнутое зеркало параболич. формы, покрытое отражающим свет слоем серебра. С помощью подобных О. т. в нач. 20 в. были измерены расстояния до ближайших галактик и открыто космологич. красное смещение.

Основой О. т. является его оптич. система. Гл. зеркало — вогнутое (сферич., параболич. или гиперболическое). Параболич. зеркало строит хорошее изображение только на оптич. осн. гиперболическое — вообще не строит его, поэтому применяются линзовые корректоры, увеличивающие поле зрения (рис., а). Вариантом оптич. системы является кассегренская система:



Некоторые оптические схемы крупных современных рефлекторов: а — прямой фокус; б — кассегренский фокус. А — главное зеркало, В — фокальная поверхность, стрелками показан ход лучей.

пучок сходящихся лучей от гл. параболич. зеркала перехватывается до фокуса выпуклым гиперболич. зеркалом (рис., б). Иногда этот фокус с помощью зеркала выносят в неподвижное помещение (фокус куде). Рабочее поле зрения, в пределах к-рого оптич. система совр. крупного О. т. строит несжатые изображения, не превышает 1—1,5°. Более широкоугольные О. т. выполняются по схеме Шмидта или Максутова (зеркально-линзовые О. т.). У О. т. Шмидта коррект. пластина имеет асферич. поверхность и помещается в центре кривизны сферич. зеркала. У систем Максутова aberrация (см. Аберрации оптических систем) гл. сферич. зеркала исправляются мениском со сферич. поверхностями. Диаметр гл. зеркала зеркально-линзовых О. т. не более 1,5—2 м, поле зрения до 6°. Материал, из к-рого изготовлены зеркала О. т., имеет малый термич. коэф. расширения (ТКР) для того, чтобы форма зеркал не менялась при изменении тем-ры в течение наблюдений.

Элементы оптики О. т. закрепляются в трубе О. т. Для устранения децентровки оптики и предотвращения ухудшения качества изображения при деформациях трубы под действием веса частей О. т. применяются

т. н. трубы компенсации типа, не меняющие при деформациях направление оптич. осн.

Установка (монтировка) О. т. позволяет наводить его на избранный космич. объект и точно и плавно сопровождать этот объект в суточном движении по небу. Повсеместно распространена экваториальная монтировка: одна из осей вращения О. т. (полярная) направлена в полюс мира (см. Координаты астрономические), а вторая перпендикулярна ей. В этом случае сопровождение объекта осуществляется одним движением — поворотом вокруг полярной оси. При азимутальной монтировке одна из осей вертикальна, другая — горизонтальна. Сопровождение объекта осуществляется тремя движениями одновременно (по программе, задаваемой ЭВМ) — поворотами по азимуту и высоте и вращением фотоластинки (приёмника) вокруг оптич. осн. Азимутальная монтировка позволяет уменьшить массу подвижных частей О. т., т. к. в этом случае труба поворачивается относительно вектора силы тяжести лишь в одном направлении. Подшипники монтировки О. т. обеспечивают малое трение поюк. Обычно применяются гидростатич. подшипники: осн. вращения О. т. плавают на тонком слое масла, подаваемого под давлением.

О. т. устанавливают в спец. башнях. Башня должна находиться в тепловом равновесии с окружающей средой и с телескопом. О. т., предназначенные для наблюдений Солнца, устанавливают в высоких башнях — для уменьшения влияния турбулентности вблизи нагретой Солнцем почвы, заметно ухудшающей качество изображения. Подъём О. т., предназначенного для ночных наблюдений, на высоту 10—20 м не улучшает качество изображения (как это предполагалось ранее).

Совр. О. т. можно разделить на четыре поколения. К 1-му поколению относятся рефлекторы с главным стеклянным (ТКР  $\approx 7 \cdot 10^{-6}$ ) зеркалом параболич. формы с отношением толщин к диаметру (относн. толщине)  $1/4$ . Фокусы — прямой — кассегренский и куде. Труба — силонная или решётчатая — выполняется по принципу макс. жёсткости. Подшипники обычно шариковые. Примеры: 1,5- и 2,5-метровые рефлекторы обсерватории Маунт-Вилсон (США, 1905 и 1917).

Для О. т. 2-го поколения также характерно параболич. гл. зеркало. Фокусы — прямой с корректором, кассегренский и куде. Зеркало изготовлено из пирекса (стекла с ТКР, пониженным до  $3 \cdot 10^{-6}$ ), относн. толщину  $1/8$ . Очень редко зеркало выполняется облегчённым, т. е. имело пустоты с тыльной стороны. Труба решётчатая, осуществлён принцип компенсации. Подшипники шариковые или гидростатические. Примеры: 5-метровый рефлектор обсерватории Маунт-Паломар (США, 1947) и 2,6-метровый рефлектор Крымской астрофиз. обсерватории (СССР, 1961).

О. т. 3-го поколения начали создаваться в кон. 60-х гг. Для них характерна оптич. схема с гиперболич. гл. зеркалом (т. н. схема Ричи — Кретьена). Фокусы — прямой с корректором, кассегренский, куде. Материал зеркала — кварц или ситалл (ТКР  $\approx 5 \cdot 10^{-7}$  или  $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ ), относн. толщина  $1/8$ . Труба компенсат. схема. Подшипники гидростатические. Пример: 3,6-метровый рефлектор Европейской южной обсерватории (Чили, 1975).

О. т. 4-го поколения — инструменты с зеркалом diam. 7—10 м; вход в строй их ожидается в 90-х гг. В них предполагается использование группы повдвств, направленных на значит. уменьшение массы инструмента. Зеркала — из кварца, ситалла и, возможно, из пирекса (облегчённые). Относн. толщина меньше  $1/10$ . Труба компенсационная. Монтировка азимутальная. Подшипники гидростатические. Оптич. схема — Ричи — Кретьена.

Крупнейшим в мире О. т. является 6-метровый телескоп, установленный в Спец. астрофиз. обсерватории (САО) АН СССР на Северном Кавказе. Телескоп имеет

прямой фокус, два фокуса Нюсмита и фокус куде. Монтировка азимутальная.

Известная переклетька имеется у О. т., состоящих из неск. зеркал, свет от к-рых собирается в общем фокусе. Один из таких О. т. действует в США. Он состоит из шести 1,8-метровых параболич. зеркал и по собирающей площади эквивалентен 4,5-метровому О. т. Монтировка азимутальная.

Для солнечных О. т. характерны очень большие размеры спектральной аппаратуры, поэтому зеркала и спектрограф обычно делают неподвижными, а свет Солнца падает на них системой зеркал, называемой телескопом. Диаметр совр. солнечных О. т. обычно составляет 50—100 см. Небольшие узкоапертурные, солнечные инструменты выполняются в виде рефлекторов обычного типа. Предполагается создание солнечного О. т. diam. 2,5 м.

Астрометрич. О. т. (предназначенные для определения положений космич. объектов) обычно имеют небольшие размеры и повнпм. механич. стабильность. О. т. для фотогр. астрометрии имеют спец. линзовые объективы и экваториальную монтировку. Пассажный инструмент, меридианный круг, фотогр. аэричная труба и ряд др. астрометрич. О. т. не предназначены для слежения за сущным движением объектов. Их аппаратура регистрирует прохождение объекта через оптич. ось инструмента, положение к-рой относительно меридиана и вертикали известно.

Для исключения влияния атмосферы предполагается установка О. т. из космич. аппараты.

Лит.: Методы астрономии, пер. с англ., М., 1967; Шегель, П. В., Проблемы оптической астрономии, М., 1980; Оптические телескопы будущего, пер. с англ., М., 1981; Оптические и инфракрасные телескопы 90-х гг., пер. с англ., М., 1983. П. В. Шегель.

**ОПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР** — устройство для фильтрации частотного либо углового спектра оптического излучения.

Частотные О. ф. (светофильтры) используются для выделения или подавления нек-рого заданного участка спектра широкополосного оптич. излучения. Осн. характеристики таких О. ф.: отношение ср. длины волны  $\lambda_0$  к ширине полосы пропускания (поглощения)  $\Delta\lambda$ ; контрастность — отношение коэф. пропускания фильтра в максимуме прозрачности к коэф. пропускания вне полосы пропускания. В зависимости от используемого физ. механизма частотные О. ф. разделяются на абсорбционные, интерференционные, поляризационные, дисперсионные и др.

Абсорбционные О. ф. (окрашенные стёкла, пластмассы, плёнки, поглощающие растворы и т. п.) изготавливаются из компонент, полосы селективного поглощения к-рых, накладываясь, перекрывают достаточно широкий спектральный диапазон, оставляя свободным нек-рый заданный участок спектра, к-рый и образует полосу пропускания данного О. ф. Величина  $\lambda_0/\Delta\lambda$  для таких фильтров обычно не превышает 10. В интерференционных фильтрах используется интерференция волн, отражённых от двух или более параллельных друг другу поверхностей, в результате чего коэф. пропускания такого О. ф. периодически зависит от длины волны падающего на него излучения. При использовании многослойных диэлектрич. покрытий в качестве отражающих поверхностей оказывается возможным получить О. ф. с шириной полосы менее 1 нм при прозрачности в максимуме до 80%. Действие поляризационных фильтров основано на интерференции поляризованных лучей. Простейший поляризатор, фильтр Вуда состоит из двух параллельных поляризаторов и установленной между ними двулучепреломляющей кристаллич. пластинки. При использовании комбинации таких фильтров (т. н. фильтр Лию) возможно получение весьма узких полос прозрачности (до  $10^{-2}$  нм,  $\lambda_0/\Delta\lambda \sim 10^6$ ). В дисперсионных О. ф. используется зависимость показателя преломления от длины волны. Типичные вели-

чины отношения  $\lambda_0/\Delta\lambda$  в таких фильтрах составляют 10—20.

О. ф. угл. спектра (т. н. пространственный фильтр) предназначен для устранения искажений волнового фронта дифракц. луча оптич. излучения и представляется собой конструкцию из двух собирающих линз, в общем фокусе к-рых установлена диафрагма. Диаметр диафрагмы выбирается в 1,5—2 раза большим диаметром пятна, получающегося в фокальной плоскости линзы при фокусировке ею гауссовского луча с дифракционной расходимостью. При использовании таких фильтров в мощных лазерных системах пространство между линзами вакуумируется для предотвращения пробоя воздуха.

Лит.: Зайядель А. Н., Островская Г. В., Островский Э. И., Техника и практика спектроскопии, М., 1972; Дебедева В. В., Техника оптической спектроскопии, 2 изд., М., 1986. Б. В. Жаюнов.

**ОПТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ** — см. Детектирование света.

**ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** — электромагнитные волны, длины к-рых заключены в диапазоне с условными границами от единиц нм до десятых долей м (диапазон частот  $\sim 3 \cdot 10^{17}$  —  $3 \cdot 10^{11}$  Гц). К О. и. помимо воспринимаемого человеческим глазом видимого излучения (обычно называемого светом) относятся инфракрасное излучение и ультрафиолетовое излучение. Физ. свойства О. и. этих поддиапазонов и методы исследования характеризуются значит. степенью общности. Для оптич. методов исследования характерно формирование направленных потоков О. и. с помощью оптических систем.

В оптич. диапазоне отчетливо проявляются одновременно и волновые, и корпускулярные свойства эл.-магн. излучения. Волновые свойства О. и. позволяют дать объяснения явлениям его дифракции, интерференции, поляризации. В то же время процессы фотоэлектронной эмиссии, теплового излучения невозможно понять, не привлекая представления об О. и. как о потоке частиц — фотонах. Эта двойственность природы О. и. находит общее объяснение в квантовой механике (см. Корпускулярно-волновой дуализм).

Скорость распространения О. и. в вакууме (скорость света)  $c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см/с (точное значение см. в ст. Скорость света), в любой др. среде скорость О. и. меньше. Определяемое отношением этих скоростей значение показателей преломления среды в любом случае неодинаково для разных монохроматич. составляющих О. и., что приводит к дисперсии О. и. (см. Дисперсия света).

Разл. виды О. и. классифицируют по след. признакам: по природе возникновения (тепловое, люминесцентное, синхротронное, Вавилова — Черенкова), особенностям испускания атомами и молекулами (спонтанное, вынужденное), степени однородности спектрального состава (монохроматич., вемохроматич.), степени пространственной и временной когерентности, упорядоченности ориентации электрич. и магн. векторов (естественное, поляризованное линейно, по кругу, эллиптически), степени рассеяния потока излучения (направленное, диффузное, смешанное) и т. д.

Падающий на поверхность к.-л. тела поток О. и. частично отражается (см. Отражение света), частично проходит через тело и частично поглощается в нём (см. Поглощение света). Поглощённая часть энергии О. и. преобразуется в осн. в тепловую, повышая темп-ру тела, однако возможны и др. виды преобразования энергии — фотолюминесценция, фотохим., фотоэлектрич., фотобойл. эффекты и др.

О роли О. и. в оптич. методах исследования в науке и технике см. в ст. Оптика.

Ю. С. Черныш.  
**ОПТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ** — см. Изображение оптическое.

**ОПТИЧЕСКОЕ СТЕКЛО** — стекло, предназначенное для изготовления прозрачных элементов оптич. систем, формирующих изображения, трансформирующих световые потоки или передающих информацию. Осн. от-



лчит. особенностями О. с. являются малые потери света на поглощение и рассеяние в рабочем спектральном диапазоне (до  $10^{-8}$  —  $10^{-1}$  см<sup>-1</sup>), а также высокая однородность по показателю преломления (до  $10^{-8}$ ). Первое обеспечивается выбором хим. состава О. с., высокой чистотой исходных материалов и физ.-хим. условиями синтеза; второе — механич. размешиванием и взаимодиффузией компонентов расплава О. с., осветлением (удалением пузырей) в процессе варки, последующим длит. отжигом заготовок, а также отбором годных участков О. с.

Традиционно О. с. подразделялось на бесцветное и цветное. Ныне в связи с расширением областей применения созданы новые классы О. с., предназначенные для трансформации излучения, регистрации оптич. и ионизирующих излучений и для передачи информации в составе волоконных и интегральных оптич. элементов. Каждому О. с. определ. хим. состава и свойств присвоена марка, обозначающая тип стекла и номер в пределах этого типа: сначала записываются буквы, обозначающие тип стекла (напр., К — крон, ЖС — жёлтое стекло, ГЛС — генерирующее люминесцирующее стекло, ФХС — фотохромное стекло), затем цифры, отражающие номер марки в пределах данного типа стекла (напр., ТФ40 — тяжёлый флинт № 10). В пределах данного типа О. с. могут существовать спец. серии, соответствующие особому свойству О. с. при сохранении осн. характеристик. Номер марки О. с. спец. серии становится трёхзначным, первый знак характеризует серию; напр. для радиационно устойчивых аналогов О. с. номер увеличивается на 100 (К108 вместо К8).

Бесцветное О. с. предназначено для изготовления оптич. элементов, формирующих изображение. Осн. характеристики (константы) О. с., определяющие свойства стекла и его назначение в оптич. системах, — показатель преломления  $n_p$  и дисперсия, т. е. разность показателей преломления на фиксиров. длинах волн. Для стёкол, используемых в видимой области спектра, этими характеристиками являются показатель преломления для зелёной линии ртути  $n_{p\lambda}(\lambda_0 = 546,07 \text{ нм})$ , ср. дисперсия  $n_p' - n_p''$ , где  $n_p'$  и  $n_p''$  — показатели преломления соответственно синей и красной линий кадмия ( $\lambda_p' = 479,99 \text{ нм}$ ,  $\lambda_p'' = 643,85 \text{ нм}$ ), и коэф. дисперсии (число Аббе)  $v_d = (n_p - 1)/(n_p' - n_p'')$ . В зависимости от сочетания величин этих характеристик О. с. делят на типы, представленные на диаграмме  $v_d n_p - v_d''$  (т. е. диаграмме Аббе, рис.). О. с. с малым коэф. дисперсии ( $v_d < 50$ ) обычно наз. флинтами, с большим ( $v_d > 50$ ) — кронами. Стёкла обоих типов наз. лёгкими, если показатель преломления мал, тяжёлыми — если велик. Для построения линзовых объектов с мин. аберра-

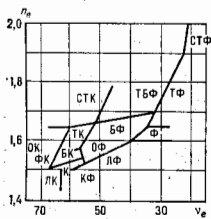


Диаграмма Аббе: ЛК — лёгкий крон; ФК — флинт крон; БК — бариевый крон; ТК — тяжёлый крон; СК — сверхтяжёлый крон; ОК — особый крон; КФ — кронфлинт; Ф — флинт; ЛФ — лёгкий флинт и соответственно ТФ, ФТ, СТФ, ОФ.

циями используют неск. типов стёкол с существенно отличающимися константами, что определяет потребность в существовании О. с. в разл. областях диаграммы Аббе. Так, для создания объектива-ахромата достаточно двух линз — собирающей из крона и рассеивающей из флинта. О. с. нормируются по показателю преломления и дисперсии, определяющим соответствие изготовленного стекла заданной марке, и по общим категориям качества — светопропусканию, оптич. однородности, двулучепреломлению, вальчию

пузырей и включений. В системах, формирующих изображение в ИК- и УФ-областях спектра, используются селективно прозрачные стёкла (напр., ИКС), и бесцветность перестаёт быть характерным свойством стёкол этого класса.

Цветное О. с., предназначенное для изготовления стеклянных абсорб. светофильтров, представляет собой стекло со специально введёнными ионными, молекулярными, коллоидными красителями или содержит микрокристаллы полупроводниковых соединений. В отличие от цветного техн. или художеств. стекла, цветное О. с. обладает высокой оптич. однородностью. Среди разновидностей цветного О. с. существуют как прозрачные, так и полностью поглощающие в видимой области, но селективно прозрачные в УФ- и ИК-областях спектра. Цветное О. с. нормируется по спектру поглощения; обозначение типа цветного О. с. условно характеризует область его прозрачности; напр., СЗС22 — синие-зелёное стекло № 22.

О. с. для трансформации излучения. Этот класс О. с. включает в себя генерирующие люминесцирующие, фотохромные и магн.-оптич. стёкла. Генерирующее люминесцирующее стекло (ГЛС) является твёрдым люминофором, используется в качестве активной среды твердотельных лазеров, нормируется по показателю поглощения активатора (преж. вводим), времени затухания люминесценции и показателю поглощения на длине волны генерации 1,06 мкм (неактивное поглощение). Фотохромные стёкла (ФХС) обеспечивают нестабильное во времени поглощение света под действием оптич. накачки или самого проходящего излучения, нормируются по макс. потемнению и степени релаксации потемнения за фиксиров. время. Магн. и т. о. п. т. ч. стёкла (МОС) вращают плоскость поляризации оптич. излучения под действием магн. поля, нормируются по величине *Вертё постоянной*.

В классе О. с. для регистрации параметров ионизирующего и оптич. излучений используются явления фото- и радиационно-стимулиров. окрашивания и люминесценции. Регистрация может быть стационарной (стёкла радиофотолюминесцирующие — РЛС, мультихромные — МХС, фоточувствительные) или динамической (стёкла сцинтиллирующие, катодолюминесцирующие — КЛС). О. с. этих типов характеризуются чувствительностью к соответствующему виду излучения, а также контрастом и разрешающей способностью, если используются для записи изображений и голограмм.

В 80–90-х гг. О. с. широко применяются для устройств передачи информации (см. *Оптическая связь, Волоконная оптика, Интегральная оптика*). Элементы таких систем — волоконные световоды, планарные и канальные волноводы, градиентные фокусирующие элементы (сефф, грабян) — изготавлиются из спец. сортов О. с. (с. в т. ч. особо прозрачных (см. *Оптика неоднородных сред*). При этом оптич. элементы формируют не механич. обработкой, а вытравливанием из размягчённого состояния и разл. видами физ.-хим. воздействий: твердотельной диффузией, ионным обменом в растворах и расплавах, осаждением из газообразной фазы, градиентной термообработкой и т. д. Отечеств. промышленность производит ок. 300 марок О. с., что отвечает номенклатуре передовых стран мира.

Лит.: ГОСТ 3514–78. Стекло оптическое бесцветное; ГОСТ 9411–81. Стекло оптическое цветное; М. Н. Токмат, Л. Б. Глебов, Е. И. Галонин.

**ОПТОВОЛОКОННЫЕ ПРИЕМНИКИ ЗВУКА** — приёмники, действие к-рых основано на изменении параметров световода (показатели преломления, длины, формы и т. п.) под действием звуковой волны и возникающей в результате этого модуляции характеристик световой волны (фазы, поляризации, амплитуды), распространяющейся в световоде. В состав О. п. з. входят источник света (лазер, светодиод), чувствит. элемент — световод и фотоприёмник, регистрирующий изменения мощности света на выходе световода, либо оптич. слес-

тема обработки выходного сигнала. В большинстве конструкций О. п. з. применяются также акустOMEХАИЧ. преобразователи, обеспечивающий заданный характер деформаций световода под действием звуковой волны. В соответствии с тем, какой из параметров света используется для определения характеристик звуковой волны, О. п. з. подразделяют на интерферометрич., поляризац. и амплитудные.

В приёмниках на основе фазовой модуляции света приём звука осуществляется с помощью интерферометрич. схем (Маха — Цендера, Майкельсона, Фабри — Перо и др.) благодаря интерференции световых волн, по-разному промодулированных звуком. Изменение фазы световой волны  $\Delta\varphi$  происходит в результате изменения эфф. показателя преломления  $n_{эф}$  и длины световода  $L$  под действием звукового давления  $p$ :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial n_{эф}}{\partial p} + \frac{n_{эф}}{L} \frac{\partial L}{\partial p} \right) pL,$$

где  $\lambda$  — длина волны света. Простейший приёмник на основе фазовой модуляции света (рис. 1) представляет собой двухлучевую оптоволоконный интерферометр, в одном плече к-рого расположен сигнальный световод 4, помещённый в акустич. поле, в другом — опорный световод 5, изолированный от звука либо обладающий меньшей чувствительностью к звуковому давлению, что достигается соответствующим выбором упругих свойств покрытий световода, его длины и др. Световые волны, выходящие из опорного и сигнального световодов, интерферируют на фотокатоде, в результате чего мощность света, попадающего на фотоприёмник 6, модулируется в соответствии с изменяющейся разностью фаз между волнами. На выходе фотоприёмника при этом наблюдается электрИЧ. сигнал звуковой частоты.

В О. п. з. на основе однолучевого интерферометра Фабри — Перо модуляция фазы света в световоде преобразуется в модуляцию интенсивности благодаря многолучевой интерференции лучей разл. порядков отражения от торцов световода.

В интерферометрич. О. п. з. применяются как одноомодовые, так и многоомодовые световоды. В приёмниках с многоомодовыми световодами может использоваться также межмодовая интерференция. Оптим. режим работы приёмника определяется условием  $\varphi_0 = \pi/2$ , где  $\varphi_0$  — пост. разность фаз интерферирующих волн. Сигнал на выходе приёмника линейно зависит от звукового давления при условии  $\Delta\varphi \ll 1$ .

Поляризац. модуляция в О. п. з. (рис. 2) имеет место при наличии анизотропных напряжений и деформаций

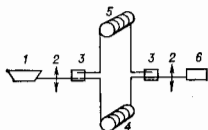


Рис. 1. Приёмник звука с интерферометром Маха-Цендера: 1 — лазер; 2 — микропроблентивы; 3 — ответвитель; 4 — сигнальный световод на кварце; 5 — опорный световод; 6 — фотоприёмник.

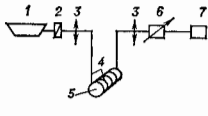


Рис. 2. ПоляризацИОННЫЙ приёмник звука: 1 — лазер; 2 — четвертьволновая пластинка; 3 — микропроблентивы; 4 — световод; 5 — упругий цилиндр; 6 — поляризацИОННЫЙ анализатор; 7 — фотоприёмник.

в световоде 4 (закручивание, сжатие, изгиб), к-рые обуславливают двулучепреломление в одноомодовых волоконных световодах. В таком анизотропном оптич. волокне оказывается возможным распространение двух ортогонально поляризов. световых волн с разл. фазовыми скоростями. Воздействие акустИЧ. волны на двулучепреломляющий световод вызывает изменение разности фаз между ортогонально поляризов. модами, к-рое преобразуется с помощью поляризац. анализатора 6

в модуляцию интенсивности света на фотоприёмнике 7. Оптим. режим работы и условие линейности определяются теми же соотношениями, что и для интерферометрич. приёмников. В поляризац. приёмниках широко применяются акустOMEХАИЧ. преобразователи в виде цилиндра 5 из упругого материала (резина, пластмасс и т. п.), на к-рый навит чувствит. элемент — одноомодовый световод 4.

Модуляция света в амплитудных приёмниках связана, как правило, с появлением под действием звука дополнит. центра оптич. мощности (на изгибах и микроизгибах световода, вследствие изменения числовой апертуры световода, в результате дифракции света на звуке достаточно высоких частот и др.). В приёмниках этого типа применяются как одноомодовые, так и многоомодовые световоды. Наиб. типичный акустOMEХАИЧ. преобразователь 4 амплитудного приёмника (рис. 3) представляет собой две зубчатые пластины, между

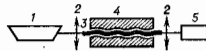


Рис. 3. Амплитудный приёмник звука: 1 — лазер; 2 — объектив; 3 — световод; 4 — акустOMEХАИЧ. преобразователь — зубчатые пластины; 5 — фотоприёмник.

к-рыми помещён волоконный световод. Воздействие звукового давления на пластины вызывает изменение расстояния между ними и соответственно изменение профиля изгиба световода, что приводит к модуляции потерь оптич. мощности в световоде. Чувствительность приёмника зависит от профиля показателя преломления световода, формы изгиба и распределения энергии по модам. Использование пространственных фильтров позволяет возбуждать и детектировать заданные моды и пресраствать таким образом чувствительность приёмника.

АкустИЧ. преобразование в чувствит. элементе О. п. з. удобно характеризовать параметром  $\mu$ , представляющим относит. изменение мощности света  $I$  на выходе световода под действием звукового давления, приведённое к единице длины световода и единице давления:

$$\mu = \frac{\Delta I}{I p L} = \frac{\Delta\varphi}{pL}.$$

Этот параметр определяет чувствительность О. п. з.  $M$  [мкВ/Па], к-рая обычно пропорц. длине световода  $L$  и мощности источника света. Наиб. высоким значением  $\mu$  характеризуются, как правило, интерферометрич. приёмники. Напр., для приёмника на основе интерферометра Маха — Цендера с чувствит. элементом в виде кварцевого световода с полиамидным покрытием, навитого на цилиндр из полиуретана, значение  $\mu = 10^{-11} - 10^{-8}$  рад/м·Па. Соответствующий параметр О. п. з. на основе поляризац. модуляции в том же чувствит. элементе прибл. на два порядка меньше.

Достоинствами О. п. з. являются слабая подверженность влиянию эл.-магн. помех, относительно высокая чувствительность и большой динамич. диапазон, возможность стыковки с системами оптич. обработки информации и относит. простота способов построения приёмников с распределёнными параметрами. О. п. з. находят применение в качестве виброфонов, микрофонов, виброметров. Порог чувствительности, т. е. мин. звуковое давление, обнаруживаемое на фоне собств. шумов, для большинства О. п. з. сопоставим с порогом слышимости (см. Пороги слуха) и уровнем шумов океана и составляет  $\sim 0-40$  дБ относительно 1 мкПа/Гц<sup>1/2</sup>. При этом характерный динамич. диапазон большинства О. п. з. составляет 110—130 дБ. Осн. вклад в собств. шуму О. п. з. дают дробовой эффект в фотоприёмнике и шуму источника света (частотные и амплитудные). Последние преобладают на НЧ (десятки, сотни Гц). Значит. влияние на параметры О. п. з. могут оказы-

вать температуры и вибрал. внеш. воздействия. Они, в частности, вызывают нарушение оптич. режима работы и наиб. существенны для интерферометрии. О. п. с. Температурный коэф. изменения фазы света в кварцевом световоде составляет  $\sim 100$  рад/м·град и превышает соответствующий коэф. полиарам. приёмников на 2–3 порядка.

Для уменьшения влияния флуктуаций параметров световода из-за внеш. воздействий применяют металлизацию покрытия световодов, эл.-механич. и эл.-оптич. системы, изменяющие длину опорного плеча, системы оптич. обработки сигнала на основе методов динамич. голографии в фоторефрактивных средах.

Лит.: Пашаев Л. М., Смирнов Ю. Ю., Волоконо-оптические приемники звука. Обзор. «Акуст. ж.», 1983, т. 29, № 3, с. 289; Балаев В. И., Мшин Е. В., Пятачкин В. И., Волоконо-оптические датчики параметров физических полей. «Квантовая электроника», 1984, т. 11, № 1, с. 19; Cui Shan W., Optical fiber sensing and signal processing, Л., 1984.

**ОПТОЭЛЕКТРОНИКА** — область физики и техники, использующая эффекты взаимного преобразования электрич. и оптич. сигналов. Хотя эффекты преобразования световой энергии в электрическую (детектирование света с помощью фотоприёмников) и обратное преобразование (электролюминесцентные источники) были известны давно, термин «О.» возник лишь после того, как эти преобразования стали использоваться в вычислит. технике, и прежде всего для взаимных превращений световых и электрич. сигналов при отображении, хранении, передаче и обработке информации. Термин «О.» вошёл в употребление в 1960-х гг., когда появились приборы — *оптрона*, в к-рых для обеспечения надёжных гальванич. развязок между электронными цепями используется пара «источник света (светодиод) — приёмник этого излучения».

Применение оптич. сигналов в принципе позволяет увеличить скорость передачи и обработки информации благодаря более высокой несущей частоте и возможности параллельного функционирования мн. каналов. Однако в наиб. степени пока используются такие свойства оптич. сигналов, как высокая помехозащищённость, обеспечение надёжных гальванических развязок между электронными цепями, слабое затухание в волоконных световодах и возможность острой фокусировки.

Поскольку оптоэлектронные приборы предназначены прежде всего для вычислит. техники и информ. систем, они должны обладать компактностью, малым потреблением энергии и высоким кпд.

Осп. элементами О. являются источники излучения (когерентные и некогерентные), фотоприёмники, модуляторы, детекторы, волоконные световоды и соединяющие элементы, мультиплексоры и демультиплексоры, а также пространственно-временные модуляторы света (управляемые транспаранты), используемые для двумерного динамич. отображения и обработки информации.

**Источники излучения.** К некогерентным источникам излучения относят источники спонтанного излучения. Это — *светодиоды* (СД), из к-рых наиб. распространёнными являются СД на основе гетероструктур системы AlGaAs. Рекордный кпд этих СД превышает 20% (однако при ВЧ электрич. модуляции он уменьшается), их быстротейшие достигают 0,1 нс. В отличие от когерентных источников СД обладают большой угл. апертурой и спектральной шириной излучения. Изготавливаются матрицы СД.

Когерентными источниками излучения в О. служат гл. обр. *инжекционные лазеры*. Применяются гетероструктуры, из к-рых также наиб. распространёнными являются системы AlGaAs. Вследствие лазерного эффекта ширина линии  $\Delta\lambda \sim 0,1$  нм, расходимость луча не более 30°, кпд до 50%. Длина волны меняется в зависимости от состава твёрдого раствора активной области. Наиб. освоен (на 1990) диапазон длин волн от

0,78 мкм до 1,55 мкм, хотя существуют более длинноволновые и коротковолновые лазеры. Частота модуляции излучения нижек. лазеров достигает 20 ГГц. В монопольном (интегральном) виде изготавливаются строчки (до 100 элементов на  $\text{см}^{-2}$ ) и матрицы нижек. лазеров.

**Приёмники излучения.** В качестве них используются фотодиоды (ФД), гл. обр. *pin*-диоды и фотодиоды Шоттки. В *pin*-диодах быстротейшие  $\leq 1$  нс, квантовая эффективность до 90%, усиление фототока практически отсутствует, материалы: GaAs ( $\lambda \leq 0,8$  мкм), InGaAs ( $\lambda = 1,3$ –1,55 мкм). В фотодиодах Шоттки быстротейшие также  $\leq 1$  нс; квантовая эффективность до 40%, материалы:  $n$  — GaAs, GaAs — AlGaAs, InGaAs ( $\lambda = 0,82$ –1,6 мкм).

Там, где требуется высокая чувствительность, применяются фототранзисторы и лавинные ФД. Они обладают внутр. усилением до 100 и более; материалы: Ge, InGaAs, InGaPAs, GaAs, Si. В качестве фотоприёмников используются также лавинные фотосопротивления с малым зазором между омическими контактами и экстрингирующими электродами, быстротейшие 80–200 пс, материалы: InGaAs ( $\lambda = 1,3$ –1,5 мкм),  $p$  — GaAs ( $\lambda \leq 0,85$  мкм) и др.

Особое значение для О. приобретают строчки и матрицы фотоприёмников, использующие эффект арядовой связи в полупроводниках (см. *Прибор с зарядовой связью*). Эти приёмники позволяют принимать, хранить некоторое время и последовательно передавать при считывании оптич. сигналы. Такие фотоприёмники широко применяются для регистрации изображений и их последоват. передачи по каналам связи. По чувствительности они не уступают обычным фотоприёмникам. Осп. материал — Si.

**Модуляторы.** Как правило, в СД и нижек. лазерах осуществляется внутр. модуляция путём изменения питающего тока. Для внеш. модуляции используется в осн. эл.-оптич. эффект в  $\text{LiNbO}_3$ . Однако полупроводниковое напряжение в этом кристалле более 1 кВ. Разрабатываются др. материалы — с меньшим полупроводниковым напряжением и технологически интегрально совместимые с излучателями системы AlGaAs и InGaPAs на тех же растворах.

Увеличение числа каналов связи в волоконных СД достигается также путём передачи информации по одному каналу на разных длинах волн, т. е. от разл. источников с соответствующим разделением на приёмных концах. С этой целью применяются мультиплексоры и демультиплексоры, к-рые обычно изготавливаются в интегральном виде путём соединения или ветвления оптич. волноводов. Селекторами дна волн являются дифракц. решётки, вводащими и выводящими элементами — *призмами*. Материалом служат, как правило,  $\text{LiNbO}_3$  с вводными в него легирующими добавками для создания волноводов; большие ваджки связываются с твёрдыми растворами соединений  $\text{A}^m\text{B}^n$  и  $\text{A}^m\text{B}^n$ .

**Дефекторы** лазерного излучения — необходимые элементы в системах оптич. записи и считывания информации. Они могут быть применены также как модуляторы излучения. Используется либо эл.-оптич. эффект в двулучепреломляющих кристаллах либо дифракция на акустич. волнах. Дефекторы на основе эл.-оптич. эффекта более быстротейшие, чем эл.-акустические, но обладают меньшей эффективностью.

**Пространственно-временные модуляторы** света (ПВМС) — матрицы светоканальных устройств, позволяющие создавать и обрабатывать двумерные изображения. Управление пропусканием ПВМС может осуществляться электрич. или магн. полями (эл.-оптичские или магн.-оптичские управляемые транспаранты соответственно) или слабыми световыми сигналами (оптичские управляемые транспаранты). Наиб. распространение получили ПВМС на жидких кристаллах. Они обладают помчи. полуволовым напряжением ( $\sim 1\text{В}$ ), но их быстротейшие не превышают десятков мкс. Применение спед. керамики для ПВМС обеспечивает быстро-

действие до  $10^{-3}$  с, но полувольтное напряжение значительно выше ( $\sim 100$  В).

Для передачи оптич. сигналов в О. возможно использование как свободного пространства, так и волоконных световодов, обеспечивающих исключительно высокую помехозащищенность при потерях менее 1 дБ/км.

Увеличение кол-ва и ассортимента выпуска элементов О. происходит очень интенсивно, составляя ежегодный прирост ок. 20%. что связано с большим коммерч. выпуском систем, базирующихся на оптоэлектронных элементах. Наиб. распространение получили лазерные звукопроекторы, в к-рых информация записана в цифровом представлении на жестких или гибких дисках (компакт-диски) и считывается острофокусируемым лучом инжект. лазера. Выпускаются (в Японии) видеопроекторы, работающие по этому же принципу.

Большое значение приобретают оптоэлектронные элементы для волоконно-оптич. линий связи, к-рые должны заменить совр. кабельные линии связи на длинные и короткие дистанции, решить проблемы кабельного телевидения и видеотелефонов. Несколько световолоконных кабелей соединили Америку с Европой, прокладываются кабели через Тихий океан. Источниками световых сигналов в этих линиях являются инжект. лазеры, приёмники — быстродействующие лавинные ФЭД; через неск. десятков км располагаются ретрансляц. узлы (лазер — фотоприёмник), компенсирующие ослабление и дисперсию световых сигналов.

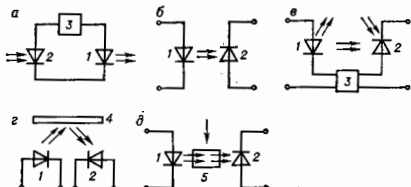
О. позволяет создать перестраиваемые процессоры, управляемые ПВМС и матрицами фотоприёмников, а также обеспечивает построение БИС и СБИС (см. *Интегральная схема*), допускающих интеграцию в третьем (вертикальном) измерении. С О. связывают надежды на возможность дальнейшего совершенствования вычислит. техники: передача информации будет осуществляться оптич. сигналами, что позволит вести обработку одновременно по м. параллельным каналам, близко расположенным друг к другу, обладающим высокой помехозащищенностью. Продолжаются интенсивные исследования по созданию новых оптоэлектронных элементов, к-рые имели бы два устойчивых состояния и выполняли бы в оптике роль, аналогичную роли транзисторов в электронике. Создание таких элементов позволит начать конструирование оптических (или оптоэлектронных) вычислит. машин (ОВМ и ОЭВМ), превосходящих по производительности ЭВМ и способных выполнять  $10^{13}$  операций в с и более.

Лит.: З и С. М., Физика полупроводниковых приборов, пер. с англ., кн. 1—2, М., 1984; Х и е п е р д ж е р Р., Интегральная оптика, пер. с англ., М., 1985; Морозов В. Н., Оптоэлектронные матричные процессоры, М., 1985; Пространственные модуляторы света, М., 1987; Инжекционные лазеры в системах передачи и обработки информации, М., 1987.

Ю. М. Попов.

**ОПТРОН** — оптоэлектронный прибор, состоящий из оптич. излучателя и фотоприёмника, объединённых один с другим оптич. и электрич. связями и помещённых в общий корпус. Физ. основу работы О. составляют процессы преобразования электрич. сигналов в оптические (в излучателе), оптич. сигналов в электрические (в фотоприёмнике), а также передачу этих сигналов по оптич. каналам и электрич. цепям. Излучателем в О. обычно служат излучающий *светодиод* (напр., на основе AlGaAs или GaAsP), фотоприёмником — фотодиод, фототранзистор, фототристор (преим. кремниевые), фоторезистор (напр., на основе CdS), материал оптич. канала — прозрачные полимеры, стекла, волоконные световоды, воздух. В цепи электрич. связи могут дополнительно включаться микроэлектронные блоки, такие, как усилители, пороговые схемы, источники питания. Наиб. перспективны монолитные О., в к-рых излучатель и фотоприёмник реализованы в едином интегриров. устройстве (напр., методами интегральной оптики).

Типы связей между излучателем и фотоприёмником определяют функциональные возможности О. При наличии только прямой электрич. связи О. представляет собой прибор с оптич. входом и выходом (напр., а), обеспечивающий преобразование излучения (рис.,



Электрические и оптические связи в оптронах: 1 — излучатель; 2 — фотоприёмник; 3 — микроэлектронный блок; 4 — отражатель; 5 — управляемая оптическая среда.

инфракрасного в видимое, некогерентного в когерентное и т. п.). При наличии только прямой оптич. связи О. — прибор с электрич. входом и выходом (рис., б), играющий роль элемента гальванич. развязки. Регенеративный О. (рис., в), в к-ром усиленный сигнал с выхода подается на вход и к-рый способен выполнять ф-ции усилителя, генератора, переключателя как электрич., так и оптич. сигналов, может быть реализован с помощью прямой электрич. и положительной обратной оптич. связи. О. с открытым (рис., з) или управляемым (рис., г) оптич. каналом связи используется как датчик, позволяющий осуществлять счёт предметов, контроль качества их поверхности, измерение электрич. и магн. полей, скорости вращения, давления, ускорения, вибрации.

Наибольшее промышленное распространение получили О. с прямой оптич. связью (рис., б), называемые также *оптопарами*; для них характерны практически полная гальванич. развязка входа и выхода, высокая электрич. прочность, однонаправленность потока информации по оптич. каналу, отсутствие обратного воздействия фотоприёмника на излучатель, широкая полоса пропускания, большой срок службы, малые габариты и масса. Осн. параметры О.: коэф. передачи тока из входной цепи в выходную ( $\sim 1-10\%$  и  $50-5000\%$  при использовании фотодиода и фототранзистора соответственно; время задержки сигнала (30—100 нс и  $1-10$  мкс для упомянутых фотоприёмников); напряжение изоляции (типично  $1-3$  кВ). К выходу О. подключают усилители и преобразователи фотосигнала, обычно в интегральном исполнении (либо эти схемы изготавливают на одном кристалле с фотодиодом — оптоэлектронная микросхема).

О. с прямой оптич. связью нашли применение в вычислит. технике, приборостроении, автоматике, электротехнике, связи в качестве элементов электрич. развязки (аналог импульсных трансформаторов) и бесконтактного управления (аналог реле).

Лит.: Н о с о в Ю. Р., Сидоров А. С., Оптроны и их применение, М., 1981.

Ю. Р. Носов.

**ОРАНЖЕВЕРНЫЙ ЭФФЕКТ** — то же, что *парниковый эффект*.

**ОРБИТА** (от лат. orbita — колея, путь) точки  $z$  относительно *группы*  $G$ , действующей на множестве  $X$  (слева), — множество  $G(z)$ , элементами к-рого являются точки  $gz$ , где  $g \in G$ . Напр., О. группы вращений в евклидовом пространстве являются концентрич. сферы с центром в начале координат, включая сферу радиуса 0. Орбиты любых двух точек из  $X$  либо не пересекаются, либо совпадают, т. е. О. определяют разбиение множества  $X$ . Если в  $X$  имеется только одна О., то  $X$  наз. однородным пространством группы  $G$ . В этом случае говорят,

что  $G$  действует на  $X$  транзитивно. Сама  $O$ . также является однородным пространством.

Понятие  $O$ . существенно в теории калибровочных полей, где возникает необходимость фиксировать калибровку, т. е. выделить по одному представителю из  $O$ . каждой точки относительно группы калибровочных преобразований.

**ОРИТАЛЬ** — ф-ция пространственных переменных одного электрона, имеющая смысл волновой ф-ции электрона, находящегося в поле атомного или молекулярного остова. Если такая ф-ция учитывает спин электрона, то она наз. спин- $O$ . Подробнее см. *Молекулярная орбиталь*.

**ОРИТАЛЬНОЕ КВАНТОВОЕ ЧИСЛО** (азимутальное квантовое число) — квантовое число  $l$ , определяющее величину орбитального момента кол-ва движения (момента импульса)  $L$  микрочастицы в сферически-симметричном поле:  $L^2 = \hbar^2 l(l+1)$ , где  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$  Проекция  $L_z$  на произвольно выбранное направление (ось  $z$ ) также квантуется:  $L_z = \hbar l$ , где  $m = l, l-1, \dots, -l-1$  магнитное квантовое число, принимающее  $2l+1$  значений.

$O$ . к. ч. определяет кратность вырождения уровней энергии,  $k$ -рая равна  $2l+1$ . В чисто кулоновском поле существует дополнит. (водородное) вырождение: энергия состояния не зависит от  $l$ .  $O$ . к. ч. целиком определяет чётность состояния: состояние с положительным значением множителя  $(-1)^l$  наз. четным, с отрицательным — нечетным. Принято обозначать состояния, соответствующие значениям  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ , буквами латинского алфавита  $s, p, d, f, \dots$  Электр. и магн. мультиплетные переходы происходят при изменении квантовых чисел  $l$  и  $m$  в соответствии с *отбора правилами*. Для системы, состоящей из  $i$  независимых частиц, полный орбитальный момент системы в сферически-симметричном поле определяется по правилу сложения угл. моментов суммой  $L = \sum_i l_i$ , а чётность состояния — арифметич. суммой  $\sum_i l_i$ .

**ОРИТАЛЬНЫЙ МОМЕНТ** (момент количества движения) — динамич. характеристика движения частицы или механ. системы, связанная с вращением. В классич. механ.  $O$ . м. систем частиц (материальных точек) относительно центра  $O$  равен

$$L = \sum_i [r_i, p_i], \quad (1)$$

где индекс  $\alpha$  нумерует частицы,  $r_\alpha$  и  $p_\alpha = m_\alpha v_\alpha$  — радиус-вектор (проведённый из начала координат  $O$ ) и импульс  $\alpha$ -й частицы ( $m_\alpha$ ,  $v_\alpha$  — масса и скорость частицы). Из изотропии пространства следует, что при произвольном движении замкнутой системы вектор  $L$  сохраняется по величине и направлению (закон сохранения момента). Значение  $O$ . м. зависит, вообще говоря, от выбора начала координат. А именно, при сдвиге на вектор  $a$  ( $r_\alpha = r'_\alpha + a$ ) имеем

$$L = L' + [aP], \quad (2)$$

где  $P = \sum_i p_i$  — полный импульс системы. На законе сохранения  $O$ . м. эта неоднозначность не сказывается, т. к. у замкнутой системы полный импульс  $P$  также сохраняется. В этом случае, когда  $P = 0$  (т. е. система как целое покоится), её  $O$ . м. не зависит от выбора начала координат.

Компоненты  $O$ . м. имеют след. скобки Пуассона:

$$\{L_i, L_j\} = -\epsilon_{ijk} L_k, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{ijk}$  — полностью антисимметричный тензор ( $\epsilon_{123} = 1$ ; значения  $i = 1, 2, 3$  соответствуют осям  $x, y, z$ ). Для системы частиц, находящейся под действием внеш. сил, изменение  $O$ . м. во времени связано с полным моментом внеш. сил  $N$ :

$$\frac{dL}{dt} = N = \sum_i [r_i, f_i], \quad (4)$$

где  $f_\alpha$  — сила, приложенная к  $\alpha$ -й частице. В этой сумме должны учитываться только внеш. силы, т. к. сумма моментов всех сил, действующих внутри замкнутой системы, всегда равна нулю.

При переходе к квантовой механике переменные  $r_\alpha$ ,  $p_\alpha$  заменяются операторами  $\hat{r}_\alpha$ ,  $\hat{p}_\alpha$ , причём  $\hat{r}_\alpha = r_\alpha$ ,  $\hat{p}_\alpha = -i\hbar \nabla_\alpha$ , где  $\nabla_\alpha = (\partial/\partial x_\alpha, \partial/\partial y_\alpha, \partial/\partial z_\alpha)$ , а  $O$ . м. — оператором  $L = [\hat{r}, \hat{p}]$ . Соотношение (3) заменяется коммутатором

$$[L_i, L_j] = L_i L_j - L_j L_i = i\hbar \epsilon_{ijk} L_k, \quad (5)$$

из к-рого следует, что разл. компоненты оператора  $O$ . м.  $L_i$  не коммутируют между собой и поэтому, в соответствии с общими принципами квантовой механики, компоненты момента  $L_i$  не являются одновременно измеримыми величинами (за исключением случаев  $L = 0$ , когда все компоненты  $O$ . м. также имеют нулевые значения). Поскольку  $[L^2, L_i] = 0$ , то одновременно измеримы квадрат  $O$ . м. и один из его компонент, в качестве к-рой обычно выбирают  $L_z$ . Возможные наблюдаемые значения этих величин совпадают с собств. значениями  $\lambda$ ,  $m$  соответствующих операторов и определяются из ур-ний

$$\begin{aligned} \hat{L}^2 \psi &= -\hbar^2 \left\{ \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left( \sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta} \right) + \frac{1}{\sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial\phi^2} \right\} \psi = \lambda \psi, \\ \hat{L}_z \psi &= -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial\phi} = \mu \psi, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\theta$  и  $\phi$  — углы в сферич. системе координат, причём  $\phi$  — угол поворота вокруг оси  $z$  ( $\psi$  — собств. ф-ции операторов  $\hat{L}^2$  и  $\hat{L}_z$ , общие для обеих операторов). Однозначные и всюду ограниченные (на единичной сфере) решения этих ур-ний существуют только при

$$\lambda = l(l+1)\hbar^2, \quad \mu = m\hbar, \quad (7)$$

где  $l$  (т. к. орбитальное, или азимутальное, квантовое число) принимает значения  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ , а  $m$  (магн. квант. число) определяет величину проекции  $O$ . м. на ось  $z$  и принимает  $2l+1$  значений:  $m = l, l-1, \dots, -l$ , что даёт кратность вырождения уровней энергии с данным  $l$ , равную  $2l+1$ . Т. о., в квантовой механике возникает квантование  $O$ . м.

Решения ур-ния (6) совпадают со сферическими функциями  $\psi = Y_{lm}$ ,

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = \text{const} \cdot P_l^m(\cos\theta) e^{im\phi}, \quad (8)$$

где  $P_l^m$  — присоединённые полиномы Лежандра. В простейших случаях  $l = 0$  ( $S$ -состояние) и  $l = 1$  ( $P$ -состояние)  $Y_{lm}$  выражаются след. образом:

$$\begin{aligned} Y_{00} &= (4\pi)^{-1/2}, \quad Y_{10} = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/2} \cos\theta, \quad Y_{1\pm 1} = \\ &= \mp \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{1/2} \sin\theta e^{\pm i\phi} \end{aligned} \quad (8a)$$

[в литературе встречаются и др. определения  $Y_{lm}$ , отличающиеся от (8a) фазовыми множителями]. Сферич. ф-ция образуют ортонормированную систему:

$$\int Y_{lm}^* Y_{l'm'} d\Omega = \delta_{ll'} \delta_{mm'}, \quad (9)$$

где  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$  — элемент телесного угла, а интегрирование ведётся по единичной сфере ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ,  $0 \leq \phi \leq 2\pi$ ),  $\delta_{ll'}$  — символ Кронекера. Величина  $|Y_{lm}(\theta, \phi)|^2$  определяет угловую зависимость плотности вероятности пространственного распределения для частицы, находящейся в состоянии с квантовыми числами  $l$ ,  $m$ .

$O$ . м. и квантовое число  $l$  играют важную роль в классификации состояний квантовых систем. Электрон

в атоме движется в результирующем, *самосолаивающемся* поле, к-рое возникает при сложении кулоновского поля ядра и поля остальных электронов. Приближённо можно считать, что это поле является сферически-симметричным, и пренебречь *спин-орбитальным взаимодействием* (что справедливо для не слишком тяжёлых атомов). В этом случае квантовые состояния электрона в атоме характеризуются определ. значениями  $l$ . В сферич. ядре состояния нуклона, движущегося в усреднённом поле остальных нуклонов, также характеризуются значениями  $l$  (ядерные оболочки). Даже в тех случаях, когда потенциал взаимодействия не является сферически-симметричным и, следовательно,  $l$  не сохраняется (т. е. не имеет вполне определ. значения), состояния с определёнными  $l$ ,  $m$  часто используются в качестве базиса для разложения волновой ф-ции. Во мн. случаях это является эфф. методом численного решения *Шрёдингера уравнения* для потенциалов, не обладающих сферич. симметрией.

Классификация квантовых состояний частицы по значениям  $l$  встречается в теории атома, теории ядра и ядерных реакций, теории столкновений, физике элементарных частиц и др.

О. м. микрочастицы (электрон, атом, ядро и т. д.) связан с движением в пространстве. Помимо О. м., микрочастица, как правило, обладает внутренним, или сплювным, моментом  $s$ , имеющим чисто квантовое происхождение (спин исчезает при переходе к пределу  $\hbar \rightarrow 0$  и не допускает классич. интерпретации). При наличии спина из изотропии пространства следует, что сохраняются не  $l$  и  $s$  по отдельности, а лишь полный момент  $j = l + s$  (см. *Квантовое сложение моментов*). При этом собств. значения оператора  $J^2$  равны  $j(j+1)\hbar^2$ . Волновая ф-ция с определ. значениями  $j$  и  $m_j$  может быть построена из координатной и спиновой волновых ф-ций с помощью *Клебша — Горбана коэффициентов*. Имеются *отбора правила* для переходов между состояниями с определёнными  $l$  и  $j$ , к-рые играют важную роль в теории эл.-магн. переходов в атомах и ядрах, при рассмотрении распадков элементарных частиц и т. д.

Лит.: Давидау Л. Д., Лишиц Е. М., Квантовая механика. Перевод с английской теории, 4 изд., М., 1989; и ж. е. Механика, 4 изд., М., 1989; Баршало в и ч. Д. А., Москале в А. Н., Харченко в В. К., Квантовая теория углового момента, Л., 1975. В. С. Попов.

**ОРГАНИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ** — соединения, содержащие наряду с углеродом также элементы из набора Н, N, S, Se, O, P, обладающие проводимостью  $\sigma \geq 1 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  (низким уд. сопротивлением  $\rho$ ) и такой же температурной зависимостью  $\rho(T)$ , как и металлы (уменьшение  $\rho$  при охлаждении). О. п. называют также синтетич. металлами, подчёркивая этим, что электронные свойства, характерные для металлов, получены в них путём синтеза спец. органич. соединений (природные органич. соединения не обладают металлич. проводимостью, все они являются *диэлектриками*). Поиск О. п. был стимулирован идеей У. А. Литтла (W. A. Little) о возможности достижения в проводящих молекулярных цепочках *сверхпроводимости* при комнатной тем-ре ( $T = 300 \text{ K}$ ) с помощью экзотического механизма. Синтезированы органич. соединения с  $\sigma \sim 10^2 - 10^4 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  при  $T \approx 4 \text{ K}$ . Среди них есть сверхпроводники с критич. тем-рой  $T_c \leq 10 \text{ K}$  (см. *Органические сверхпроводники*). Важной задачей является создание О. п., способных конкурировать с обычными металлами, используемыми в электронике и электротехнике.

Существующие О. п. можно разделить по структуре на два типа — кристаллы с переносом заряда и *полимеры*. Первые содержат плоские органич. молекулы с сопряжёнными связями. Молекулы играют роль доноров или акцепторов. Металлич. поведение обнаружено в кристаллах, содержащих одну из следующих четырёх молекул: молекулу тетраэтинхидриметала (TCNQ), являющегося акцептором; молекулы тетраэсетротетрацена (TSeT), тетраметилтетраселенофульва-

лена (TMTSF) или бис-этилендитволоттетрафульвалена (BEDT — TTF). Последние являются донорами. Перенос заряда осуществляется между этими молекулами и атомами (K<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>), группами атомов (SCN<sup>-</sup>, ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>, PF<sub>6</sub><sup>-</sup>, I<sub>3</sub><sup>-</sup>, AuI<sub>4</sub><sup>-</sup>) или плоскими органическими молекулами с сопряжёнными связями (хинодиметан Qn, тетрафульвален TTF) (рис. 1).

В кристаллах хорошо проводящих солей с переносом заряда плоские молекулы упакованы так, что новы одного аиака образуют стопки, чередующиеся со стопками или цепочками новов противоположного знака. Орбитали  $\pi$ -электронов сопряжённых связей плоских молекул вытянуты в виде восьмёрки перпендикулярно плоскости молекул (см. *Молекулярная орбиталь*). Они обеспечивают достаточно хорошее перекрытие электронных волновых ф-ций соседних молекул в стопке. Поэтому  $\pi$ -электроны плоских молекул делокализованы не только внутри молекулы, но и вдоль стопки. В нейтральном состоянии донорные или акцепторные молекулы содержат чётное число  $\pi$ -электронов, но при образовании кристалла число электронов в их  $\pi$ -об-

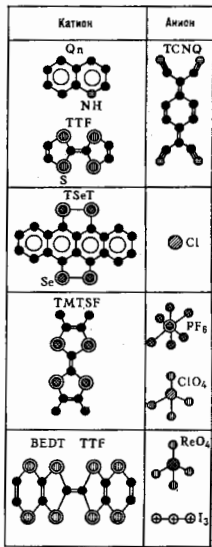


Рис. 1. Молекулы, используемые при синтезе органических проводников и сверхпроводников; чёрный круг — СН.

лоче изменяется и зона  $\pi$ -электронов в стопке оказывается заполненной частично. Т. о., реализуются два условия, необходимых для металлич. поведения электронов: частичное заполнение зоны  $\pi$ -электронов и их делокализация, по меньшей мере вдоль цепочки (рис. 2, а).

Эти условия, однако, не всегда достаточны для металлич. поведения электронов при всех тем-рах. Системы с одномерным движением электронов перехо-

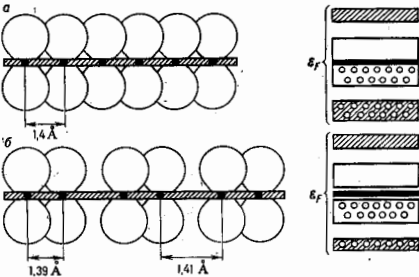
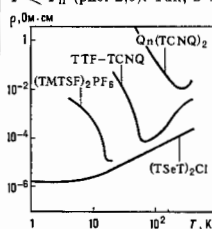


Рис. 2. а — Распределение электронной плотности  $\pi$ -орбиталей в гизотетической одномерной цепочке (слева) и энергетический спектр  $\pi$ -электрона (справа); выпуклые о-связи (вид сбоку) и соответствующие энергетические зоны; б — то же при  $T < T_c$ .

дят в диэлектрич. состоянии при охлаждении, даже если при более высоких  $T$  они проявляли металлич. свойства (см. *Квазидомерные соединения*). Такие *переходы металл — диэлектрик* могут быть вызваны т. в. пайерсовской неустойчивостью (см. *Пайерса переход*), влиянием неизбежного беспорядка или достаточно сильным кулоновским отталкиванием электронов. Пайерсовская неустойчивость присуща практически всем упорядоченным системам с сильной анизотропией одномерного типа. Если при высоких темп-рах молекулы расположены эквидистантно вдоль цепочки, то ниже темп-ры пайерсовского перехода  $T_p$  они смещаются так, что на поверхности Ферми формируются энергетич. щель, делающая систему диэлектриком при  $T < T_p$  (рис. 2, б). Так, в TTF — TCNQ при  $T = 300$  K



проводимость  $\sigma$  вдоль цепочки примерно в 350 раз выше, чем в перпендикулярных направлениях. Рост  $\sigma$  (т. е. падение  $\rho$ ) при охлаждении продолжается до 60 K, но затем о резко падает (р возрастает) из-за перехода Пайерлса (рис. 3). Беспорядок подавляет пайерсовский пе-

рис. 3. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от температуры  $T$  в органических кристаллах с переносом заряда.

рекол, но сам он приводит к локализации электронов из-за действующего на них случайного потенциала (см. *Андерсоновская локализация*), и система опять становится диэлектрической при низких темп-рах. Такое поведение наблюдается в солях TCNQ с асимметричными катионами типа  $Q_n(TCNQ)_2$ . Здесь  $\rho$  слегка падает при охлаждении от 300 K до 240 K, но при дальнейшем понижении темп-ры  $\rho$  возрастает из-за локализации электронов в цепочке TCNQ под действием хаотич. потенциала случайно ориентированных катионов  $Q_n$ .

Пайерсовская неустойчивость может быть подавлена в системах с двумерным или трёхмерным движением электронов, т. е. в кристаллах с достаточно сильным перекрытием электронных волновых функций разных цепочек. Именно на этом пути получены О. п. Впервые металлич. проводимость вплоть до самых низких  $T$  была достигнута в кристаллах  $(TSeT)_2Cl$ . Анизот-

ропия движения электронов в этом соединении меньше, чем в TTF — TCNQ, из-за большего перекрытия электронных орбиталей атомов Se молекул TSeT разных цепочек через анионы Cl<sup>-</sup>. Пайерсовский переход здесь происходит при более низкой темп-ре (24 K) и приводит не к диэлектрическому, а к полуметаллич. состоянию (см. *Полуметаллы*). При давлении выше 4,5 Кбар этот переход исчезает, и соединение остаётся металлом вплоть до  $T \sim 0,1$  K.

Уменьшение одномерного характера движения электронов было достигнуто также в солях Бекгарда  $(TMTSF)_2X$ . Здесь столби молекул TMTSF образуют слои (рис. 4), и боковые атомы Se атих молекул обеспечивают перекрытие электронных волновых ф-ций соседних цепочек в слое благодаря их сближению на расстоянии, меньшее ван-дер-ваальсовых. При  $T = 300$  K проводимость вдоль стоек катионов (TMTSF) в кристаллах  $(TMTSF)_2ClO_4$  примерно в 25 раз выше, чем поперёк стоек в слое катионов, и в 500 раз выше, чем поперёк слоя катионов. Для кристаллов  $(TMTSF)_2X$  с линейными (SCN<sup>-</sup>) и октаэдрич. ( $BrO_4^-$ ,  $ReO_4^-$ , и др.) анионами характерны структурные переходы с ориентад, упорядочением анионов при низких темп-рах, приводящие к диэлектрич. основному состоянию. Исключением оказывается лишь соединение с  $X = ClO_4^-$ , где после перехода сохраняется металлич. поведение со сверхпроводящим переходом при  $T_c = 1,3$  K. В солях с более симметричными октаэдрич. анионами типа  $PF_6^-$  упорядочение анионов не наблюдается, и в них обнаружены переходы металл—диэлектрик в состоянии с во л н а м и с п и н о в о й п л о т н о с т ь ю из-за сильного кулоновского отталкивания электронов

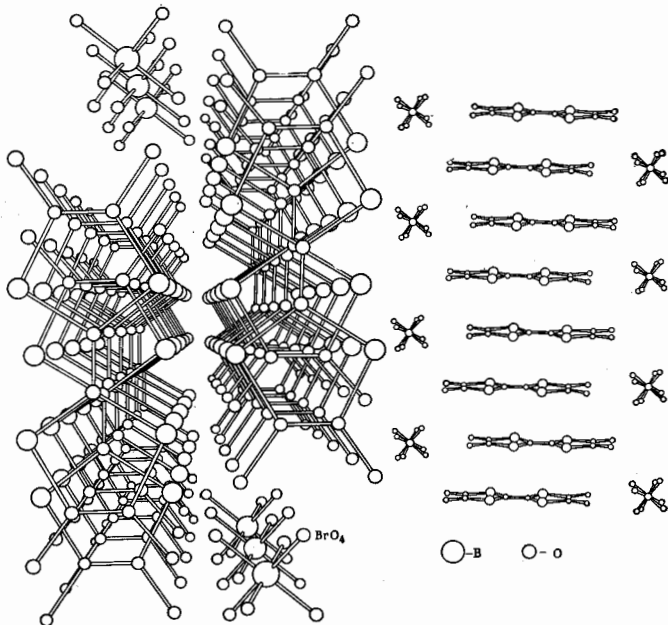


рис. 4. Кристаллическая структура  $(TMTSF)_2BrO_4$ ; вид вдоль стоек катионов (слева) и перпендикулярно стоек вдоль слоев TMTSF (справа).

в сочетании с одномерным характером анизотропии их движения (см. *Сильной вязкости воды*). Давления  $\sim 10$  Кбар подавляют эти переходы, металлы. состояние сохраняется вплоть до самых низких  $T_c$  (соединения становятся сверхпроводящими с  $T_c = 1$  К). Сильное магн. поле способно при этом восстанавливать диэлектрич. состояние. Многообразие фазовых переходов в семействе  $(TMTSF)_2X$  объясняется близостью этого семейства к квазидомерным системам, фактически оно оказывается промежуточным между ними и слоистыми системами (см. *Квазидомерные соединения, Интеркалированные соединения*).

Первыми органич. кристаллами без признаков одномерной анизотропии и диэлектрич. переходов стали соединения  $\beta$ -(BEDT — TTF) $_2X$ . Стопки молекул BEDT — TTF образуют слои, и 8 боковых атомов S в молекулах дают лучшее перекрытие электронных волновых ф-ций соседних цепочек, чем 4 атома Se в кристаллах  $(TMTSF)_2X$ . Кроме того, отклонения структуры этой молекулы от плоской ослабляют перекрытие волновых ф-ций электронов соседних молекул в стопке. В результате кратчайшими оказываются расстояния между атомами S разных молекул из соседних стоек в слое (рис. 5). Движение электронов в слое катионов (BEDT — TTF) практически изотропно при низких  $T_c$ , в то время как поперёк слоёв  $\sigma$  меньше примерно в 100 раз.

Проводящие полимеры на основе углеводородов (полиацетилен, полипиррол, полипарафенил, политиофен) имеют сопряжённые связи вдоль всей своей длины,

имеет одномерный характер. Поэтому металлич. состояние с эквидистантными расстояниями между атомами S неустойчиво относительно пайерсовских переходов с удвоением периода (димеризация, рис. 2). В результате димеризации, а также кулоновского от-

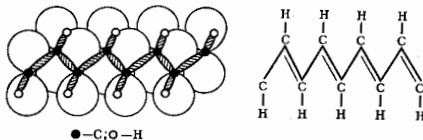


Рис. 6. Молекула полиацетилена: слева — распределение электронной плотности (заштрихованы  $\sigma$ -связи); справа — структурная формула.

талкивания в энергетич. спектре  $\pi$ -электронов полягается щель шириной 1,8 эВ. Поэтому чистый полиацетилен — диэлектрик. Легирование полиацетилена атомами K, Na, Br, I, группами атомов типа  $AsF_6^-$  либо органич. донорами или акцепторами приводит к появлению бесспиновых носителей заряда — солитонов, специфических для пайерсовского диалектрика с удвоенным периодом. Солитоны определяют проводимость соединений  $(CH_x)_y^{+}y^{-}$ ; при  $y < 0,06$  она достигает значений  $10^{-4} - 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  при  $T = 300$  К и падает при охлаждении. При  $y \sim 0,1 - 0,2$  достигаются  $\sigma \sim 10^{-4} - 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ , причём  $\sigma$  медленно падает при охлаждении. При  $y > 0,1$  появляется характерная для металла парамагн. восприимчивость (см. *Лаули парамагнетизм*). Электрохимическое осаждение (допирование) полиацетилена обратимо, и полиацетиленовая плёнка используется для изготовления аккумуляторов.

Лит.: Горьковы Л. П., Физические явления в новых органических сверхпроводниках, *СФЭИ*, 1984, т. 144, с. 38; Булаевский А. И., Булаевский Л. Н., Органические сверхпроводники, там же, с. 415; Вглаговский С. А., Кирова Н. Н., Electron selflocalization and periodic superstructure in quasi one-dimensional dielectrics, *Sov. Scient. Reviews, Ser. A Physical Review*, ed. by I. M. Chalatnikov, 1984, т. 5, p. 100; Schrieffer J. R., Proc. Intern. School of Physics «Enrico Fermi», Course LX XIX, ed. by F. Bassani, F. Fumi, M. P. Tosi, North-Holland, 1984, p. 767. Л. Н. Булаевский.

**ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ** — соединения углерода с век-рными элементами (H, O, S (или Se), N, P), обладающие сверхпроводящими свойствами. Сверхпроводящее состояние может быть достигнуто в органич. соединениях, имеющих характерный для металлов тип проводимости при низких темп-рах (см. *Органические проводники*). Исследование органич. проводников показало, что элктрич. проводимость металлич. типа наблюдается у органич. кристаллов с достаточно хорошим перекрытием электронных орбиталей (по крайней мере, в двух направлениях). Возможность достижения сверхпроводимости в соединениях без единого атома металла, но с двумерным (слоистым) характером электронного движения была установлена П. Гринном (P. L. Green) и др. (1975) в результате синтеза полимера полисульфуритрида  $(SN)_x$  (рис. 1). Молекулы в кристаллах этого полимера сближены настолько, что движение электронов в двух направлениях практически изотропно, проводимость кристаллов достигает значений  $5 \cdot 10^8 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  при 4 К, ниже критич. темп-ры  $T_c = 0,3$  К наблюдается сверхпроводимость.

Впервые О. с. удалось получить К. Бекгарду (K. Bechgaard, 1980). Он синтезировал молекулу TMTSF и использовал её в качестве катиона в кристаллах с переносом заряда  $(TMTSF)_2X$ , где роль анионов



Рис. 1. Молекула полисульфуритрида.

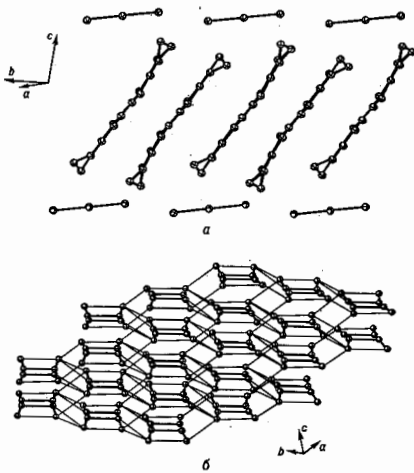


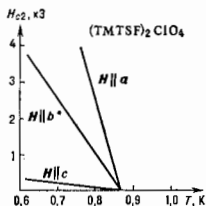
Рис. 5. Кристаллическая структура  $\beta$ -(BEDT — TTF) $_2X$ : а — вид вдоль слоёв; б — сетка атомов S в слое BEDT — TTF (остальные атомы не показаны), по которой движутся  $\pi$ -электроны. Тонкими линиями показаны расстояния S — S между молекулами, которые меньше ван-дер-ваальсовых расстояний.

х-рне обеспечивают делокализацию  $\pi$ -электронов вдоль полимерной молекулы. В простейшей молекуле этого типа — полиацетилене  $(CH_x)_y$  (рис. 6) длина цепи сопряжения  $x$  достигает неск. тысяч А. Полимерные молекулы собраны в волокна с диам. 200 А. Взаимодействие нитей в волокне слабое, и движение электронов



играют небольшие группы атомов  $X - PF_6, ClO_4, SCN$  и им подобные (см. рис. 1 к ст. *Органические проводники*, где рассмотрены хим. структуры О. с.). Плоские молекулы образуют стопки, вдоль к-рых движутся электроны проводимости —  $\pi$ -электроны атомов углерода и селена. Боковые атомы селена молекулы  $TMTSF$  обеспечивают довольно хорошее перекрытие *вакантных функций* электронов проводимости также и для молекул  $TMTSF$  соседних стопок. В результате слоев, образованные из стопок катионов  $TMTSF$ , обеспечивают двумерное движение электронов в анизотропной внутри слоев — вдоль стопок подвижность электронов наивысшая. В медленно охлаждаемых кристаллах  $(TMTSF)_2ClO_4$  сверхпроводящее состояние достигается ниже  $T_c = 1,3$  К, во всех др. соединениях семейства  $(TMTSF)_2X$  из-за анизотропии движения электронов внутри слоев охлаждение приводит к фазовым переходам *металла — диэлектрик*. Для достижения металлч. основного состояния и сверхпроводимости с  $T_c \lesssim 1$  К требуется давление порядка неск. хбар (неск. сотен МПа). В сверхпроводниках  $(TMTSF)_2X$  обнаружены все обычные проявления сверхпроводимости — нулевое электрич. сопротивление, полный *Мейснера эффект* в слабых магн. полях, скачок теплоемкости в точке  $T_c$ , уменьшение плотности состояний в спектре кваэичастиц по сравнению с нормальным состоянием. Все они относятся к сверхпроводникам 2-го рода, т. к. лондоновская глубина проникновения в них велика из-за малой плотности электронов проводимости, а сверхпроводящая корреляц. длина  $\xi = 0,18\hbar v_F/kT$  мала из-за сравнительно малой фермиевской скорости  $v_F$  электронов даже для направления вдоль стопок  $TMTSF$ . Магн. свойства сверхпроводников  $(TMTSF)_2X$ , т. е. значения нижнего ( $H_{c1}$ ) и верхнего ( $H_{c2}$ ) критических магнитных полей, сильно зависят от направления внеш. магн. поля из-за анизотропии движения электронов в нормальном состоянии (рис. 2). Поведение семейства О. с.  $(TMTSF)_2X$  при темп-рах  $T \ll T_c$  отклоняется от стандартного

Рис. 2. Зависимость верхних критических полей  $H_{c2}$  от темп-ратуры  $T$  в  $(TMTSF)_2ClO_4$ . Внешнее магнитное поле направлено: 1 — вдоль стопок (ось  $a$ ), 2 — вдоль слоев перпендикулярно стопкам (ось  $b$ ), 3 — поперек слоев (ось  $c$ ).



поведения сверхпроводников, описываемых *Бардина — Купера — Шриффера моделью* (БКШ). Так, зависимость  $H_{c2}(T)$  линейна вплоть до самых низких температур, и при  $T < T_c$  значения  $H_{c2}$  для направления вдоль оси  $a$  (вдоль стопок) превосходят парамагн. предел (согласно модели БКШ, превозводят график зависимости  $H_{c2}$  от темп-ры отрицательна, а значения  $H_{c2}$  не превосходят парамагн. предел). Вторая аномалия О. с. проявляется во влиянии немагнитных примесей на величину  $T_c$ : при довольно малой их концентрации сверхпроводимость исчезает, в то время как в модели БКШ такой эффект примесей становится заметным лишь вблизи порога *андерсоновской локализации* электронов, когда длина свободного пробега электронов приближается к межмолекулярной.

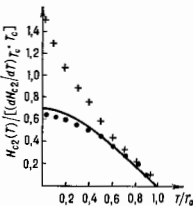
В 1987 установлено [8], что в  $(TMTSF)_2ClO_4$  скорость релаксации ЯМР при низких темп-рах уменьшается с понижением темп-ры пропорц.  $T^2$ , а не экспоненциально, как в модели БКШ. Это означает, что в семействе  $(TMTSF)_2X$  сверхпроводимость обладает рядом особенностей, обусловленных, по-видимому, специфичной

волновых ф-ций куперовских пар в этих соединениях (т. е. *d*-волновая сверхпроводимость). Сверхпроводимость сродного типа обнаружена также в системах с *тяжелыми фермионами*.

В кристаллах  $\beta$ -(BEDT — TTF) $_2X$  анизотропия в плоскости стопок (BEDT — TTF) при низких темп-рах практически отсутствует, никаких переходов типа металл — диэлектрик в соединениях с  $X = I_3^-, AuI_3^-, IV_6^-$  нет, и при атм. давлении они становятся сверхпроводниками с  $T_c = 1,5, 5$  и  $2,8$  К соответственно. Кроме того, приложенное давление  $P > 0,2$  кбар получена модификация  $\beta_N$ -(BEDT — TTF) $_2I_3$ , метастабильная при атм. давлении, имеющая  $T_c = 8,1$  К [7]. Соединения  $\beta$ -(BEDT — TTF) $_2X$  также относятся к сверхпроводникам 2-го рода, в них обнаружены полное отсутствие сопротивления ниже  $T_c$  и полный эффект Мейснера в слабых магн. полях. Как и в  $(TMTSF)_2X$ , ряд их сверхпроводящих свойств при  $T < T_c$  не согласуется с предсказаниями модели БКШ. Именно — зависимость  $H_{c2}(T)$  в случае  $\beta_N$ -(BEDT — TTF) $_2I_3$  имеет сильную пологость, кривизну (при 3), а в соединениях с  $X = AuI_3^-$  и  $IV_6^-$  она линейна. Кроме того, отношение сверхпроводящей щели (при  $T = 0$ )  $\Delta(0)$  к  $T_c$  в кристаллах с  $X = AuI_3^-$ , по крайней мере, в 4 раза превосходит значение, даваемое моделью БКШ.

Свойства О. с. могут быть объяснены в рамках представлений об обычном электронно-фононном механизме куперовского спаривания (см. *Купера эффект*). Ныне нет никаких четких эксперим. указаний на существование в них др. механизма сверхпроводимости. Ряд аномалий сверхпроводящих свойств О. с. указывает на возможность реализации в них режима сильного электронно-фононного взаимодействия. Для этого режима характерны большое отношение  $\Delta(0)/T_c$ , превышающее значение, полученное в модели БКШ, пологость кривизны в графике зависимости  $H_{c2}(T)$  и сравнительно

Рис. 3. Зависимость верхнего критического магнитного поля вещества  $\beta$ -(BEDT — TTF) $_2I_3$  от температуры (поле направлено поперек слоев). Крестики — экспериментальные значения величины  $H_{c2}(T)/[\Delta(0)H_{c2}(0)/T_c]$  приведенного критического поля — для фазы  $\beta_N$ ;  $T/T_c$  — приведенная температура. Точки — аналогичные данные для фазы  $\beta_1$ . Сплошная кривая соответствует результатам модели БКШ.



большие значения  $T_c$  при низкой дробеваской частоте фононов (в органич. соединениях эта частота соответствует *Дебай темп-ратуре*, ок. 60 К). В пользу сильной электронно-фононной связи свидетельствуют также очень низкие значения проводимости О. с. при комнатной темп-ре. Для  $\beta$ -(BEDT — TTF) $_2X$  значения проводимости лежат в интервале  $(20-70)$  Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ , и они меньше минимальной моттовской проводимости (см. *Моттовские диэлектрики*), к-рая соответствует длине свободного пробега электрона порядка межмолекулярной длины. Спектр фононов, сильно взаимодействующих с электронами, у органич. соединений богаче, чем у неорганических. Здесь есть дополнит. моды — вращение молекул (либрации) с низкими частотами  $\omega \sim 10$  К ( $\hbar\omega \sim kT$ ) и внутримолекулярные колебания с ок до 2000 К. Богатство фононного спектра и возможность направленного изменения его путем синтеза подходящих молекул делают О. с. весьма перспективными для дальнейшего повышения критич. темп-р  $T_c$ .

Лит. см. при ст. *Органические проводники*.  
Л. Н. Булавский.

**ОРЕОЛ** (франц. *auréole*, от лат. *corona aureola* — золотой венец) — световой фон вокруг изображения источника оптич. излучения, наблюдаемый глазом или регистрируемым приёмником света. Причина появления О. — рассеяние света на малые углы в среде, где к-рую проходит свет. Величина О., его окраска и яркость зависят от размеров частиц среды, их физ. природы и оптич. толщины среды. Рассеяние на малые углы, приводящее к образованию О., особенно сильно в среде, размеры частиц к-рых больше длины волны  $\lambda$  излучения (эффект Ми). Если размеры частиц значительно превышают  $\lambda$ , интенсивность такого рассеяния не зависит от  $\lambda$ , и поэтому рассеянный свет уже не характеризуется насыщенным цветом. Этим объясняется, напр., «белый цвет» О., окружающего солнечный диск (смещение лучей с разными  $\lambda$  даёт *белый свет*). О. существенно влияет на разрешающую способность фототр. материалов и люминисцентных экранов. Характер О. учитывается при измерении прозрачности рассеивающих сред; в частности, изменение яркости и спектрального распределения света в солнечном О. служит критерием чистоты и прозрачности атмосферы.

Лит. см. при ст. *Мутные среды*, *Рассеяние света*.  
Л. Н. Нагорский.

**ОРИЕНТАЦИОННЫЕ — ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ** (спина-переориентационные переходы) — особый класс магнитных фазовых переходов, при к-рых меняется ориентация осей лёгкого намагничивания магнетиков при изменении внеш. параметров (темпер., магн. поля). Эти фазовые переходы происходят между магнитоупорядоченными фазами магнетика и относятся к т. н. переходам 2-го порядка — порядку. При О. ф. п. претерпевает магнитная атомная структура и изменяется магнитная симметрия кристаллов. О. ф. п., происходящие при изменении температуры, наз. с п о н т а н н ы м и переходами, при изменении внеш. магн. поля — и д у ц и р о в а н н ы м и переходами. Простейшим примером спонтанного О. ф. п. является наблюдаемая в ряде магн. кристаллов переориентация спинов (спиновых магн. моментов) от одной кристаллограф. оси к другой при изменении температуры. Такие переходы наблюдаются, напр., в интерметаллических соединениях  $\text{RCo}_2$  (где R — Nd, Pr, Dy, Tb), ферромагнетике кобальте, в гадолинии, в интерметаллических соединениях  $\text{Mn}_2\text{Sb}$  и  $\text{Ba}_2\text{Co}_2\text{Fe}_{12}$  и в целом ряде редкоземельных магнитоупорядоченных кристаллов [1]. Спонтанная переориентация магн. моментов обусловлена в них температурной зависимостью энергии магнитной анизотропии.

В том случае, когда переориентация моментов осуществляется в нек-рой кристаллограф. плоскости кристалла, изменение термодинамич. потенциала  $\Phi$  кристалла удобно представлять в виде

$$\Phi = K_1 \sin^2\theta + K_2 \sin^4\theta, \quad (1)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — константы анизотропии, изменение к-рых с температурой и приводит к О. ф. п.;  $\theta$  — угол ориентации осей лёгкого намагничивания относительно кристаллограф. осей в плоскости переориентации. Минимизация (1) по углу  $\theta$  приводит к трём возможным состояниям системы (вблизи от О. ф. п.  $K_2$  считают не зависящей от температуры):

$$\text{фаза I } \theta = 0; \quad K_1 \geq 0;$$

$$\text{фаза II } \theta = \pi/2, 3\pi/2; \quad K_1 + 2K_2 \leq 0;$$

$$\text{фаза III } \sin^2\theta = -K_1/2K_2; \quad K_1 < 0, \quad K_1 + 2K_2 \geq 0.$$

Если  $K_1$  знакопеременна, а  $K_2 > 0$  в рассматриваемой области температур, то в кристалле могут существовать коллинеарные фазы I и II и угл. фаза III. Темпер.-р  $T_1$  [при к-рой  $K_1(T_1) + 2K_2 = 0$ ] и  $T_2$  [при к-рой  $K_1(T_2) = 0$ ] есть точки О. ф. п. I  $\rightleftharpoons$  III и I  $\rightleftharpoons$  II соответственно. На рис. 1 приведены в качестве примера температурные зависимости констант  $K_1$  и  $K_2$  гексагональных интерметаллич. соединений  $\text{NdCo}_5$  и  $\text{PrCo}_5$ ,

на рис. 2 показаны температурные зависимости угла отклонения намагниченности от гексагональной оси для этих соединений. Переходы между фазами I  $\rightleftharpoons$  III и II  $\rightleftharpoons$  III, возникающие при инверсии знака константы

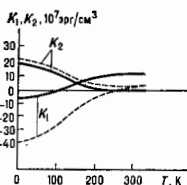


Рис. 1. Температурные зависимости констант анизотропии для  $\text{NdCo}_5$  (пунктир) и  $\text{PrCo}_5$  (сплошная линия).

анизотропии  $K_1$ , являются типичными примерами фазовых переходов, описываемых теорией Ландау [2]. Действительно, в случае, напр., перехода I  $\rightleftharpoons$  III, разложение термодинамич. потенциала (1) в ряд по  $\theta$  вблизи  $T = T_2$  даёт известное выражение теории Ландау [зависимость  $K_1(T)$  в рассматриваемой области

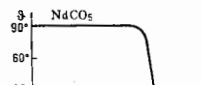


Рис. 2. Температурные зависимости ориентации осей лёгкого намагничивания для  $\text{NdCo}_5$  и  $\text{PrCo}_5$ .

температур предположить линейной):

$$\Phi = \alpha(T) \frac{\eta^2}{2} + \beta \eta^4, \quad (2)$$

где  $\alpha(T) = 2K(T) = 2K(T - T_2)/T_2$ ,  $K$  — константа,  $\beta = 4K_2$ ,  $\eta = \theta$ . Угол  $\theta$  здесь играет роль параметра порядка. Такую же форму принимает термодинамич. потенциал вблизи точки  $T = T_1$  при  $\eta = \pi/2 - \theta$  (либо  $3\pi/2 - \theta$ ). Т. о., переориентация магн. моментов, описываемая термодинамич. потенциалом (1), при  $K_2 > 0$  происходит непрерывно, путём двух фазовых переходов 2-го рода при температурах  $T_1$  и  $T_2$ . Параметр  $\theta$  (параметр порядка) меняется при этом непрерывно, а производная  $d\theta/dT$  имеет разрывы на концах области переориентации (рис. 3а). Очевидно, что вблизи

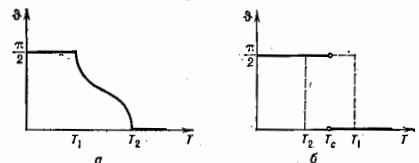


Рис. 3. Температурная зависимость угла  $\theta$  при ориентационном фазовом переходе: а —  $K_2 > 0$ ; б —  $K_2 < 0$ .

зи температур  $T_1$  и  $T_2$ , при к-рых происходят фазовые переходы 2-го рода, должны наблюдаться характерные особенности в поведении ряда термодинамич. величин: теплоёмкости, модуля Юнга и т. п., а также расхождении восприимчивости (описывающей отклик параметра порядка на термодинамически сопряжённое ему поле), обращение в нуль частоты колебаний параметра порядка (мягкая мода), замедление его релаксации и т. д. Такие аномалии в окрестности точки О. ф. п. действительно наблюдались, напр., в редкоземельных магнетиках [1]. При непрерывной переориентации магн. моментов угл. фазы III играют роль «буфера». Она позволяет магн. моментам непрерывно переходить из фазы I в фазу II. О. ф. п. относится к переходам, для к-рых теория Ландау является очень хорошим приближением, т. к. флуктуации параметра порядка в критич. состоянии здесь можно не учитывать, поскольку они проявляются в очень узкой области температур ( $\Delta T \sim 10^{-6} - 10^{-8} \text{K}$ ) вблизи точки перехода.

При  $K_2 < 0$  фаза III является неустойчивой и температурные области существования фаз I и II перекрываются. С точки зрения симметрии, непосредств. непрерывный переход I  $\rightleftharpoons$  II невозможен, т. к. для непрерывного перехода необходимо, чтобы группа магн. симметрии одной из фаз, участвующей в переходе, была подгруппой симметрии другой фазы, что для фаз I и II не выполняется. Следовательно, непосредств. переход I  $\rightleftharpoons$  II может осуществляться только скачкообразно (фазный переход 1-го рода) при  $T = T_c$ , где  $T_c$  определяется условиями равенства термодинамич. потенциалов обеих фаз:  $\Phi(\theta = 0) = \Phi(\theta = \pi/2)$ , т. е.  $K_1(T_c) + K_2 = 0$ . Темпер.  $T_1$  и  $T_2$ , определяемые уравнениями  $K_1(T_1) = 0$  и  $K_1(T_2) + 2K_2 = 0$ , есть границы областей существования метастабильных фаз (в предположении, что переход I  $\rightleftharpoons$  II происходит однородно по образцу). Разложение  $\Phi$  по  $\eta = \theta$  (либо  $\eta = \pi/2 - \theta$ ) приводит к выражению (2), где  $\beta = -4K_2 < 0$ , что, согласно теории Ландау, является признаком фазового перехода 1-го рода. На рис. 3(б) изображена зависимость  $\theta(T)$  для этого случая.

Внеш. магн. поле  $H_{\text{вн}}$  оказывает существ. влияние на О. ф. п., подавляя их или, наоборот, способствуя их возникновению. Поле  $H_{\text{вн}}$  может также индуцировать О. ф. п. Напр., в целом ряде антиферромагнетиков при достаточно большом (критическом) значении магн. поля  $H_c$ , приложенного вдоль оси антиферромагнетизма, происходит переориентации спинов, и намагниченность магн. подрешёток устанавливается перпендикулярно направлению действующего магн. поля [3] (см. *Спин-фазов переход*). Индуцированными полем О. ф. п. наблюдались также в слабых ферромагнетиках, в частности в редкоземельных ортоферритах, для к-рых были исследованы разнообразные фазовые диаграммы  $H_c - T$  [4].

Лит.: 1) Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках, М., 1979; 2) Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., *Статистическая физика*, ч. 1, 3 изд., М., 1976; 3) Воронин В. В. и др. А. С., *Антиферромагнетизм*, в кн.: *Итоги науки. Сер. Физ.-мат. науки*, в. 8, М., 1982.

**ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЯДРА** — совокупности атомных ядер с упорядоченной пространственной ориентацией их спинов. Проекция  $m$  спина  $I$  ядра на заданную ось может принимать  $2I + 1$  дискретных значений от  $m = -I$  до  $m = +I$  с интервалом, равным 1. Спинову упорядоченность относительно такой оси можно характеризовать набором вероятностей  $W_m$  реализации всех возможных значений  $m$ . Для спиново-неупорядоченной совокупности ядер все  $m$  равновероятны [ $W_m = 1/(2I + 1)$ ]. В противном случае у совокупности ядер имеется некая спиновая упорядоченность (ядра ориентированы).

Для полного описания ориентац. состояния совокупности ядерных спинов достаточно задать  $2I$  значений  $W_m$ , т. к.  $\sum_{m=-I}^{m=+I} W_m = 1$ . Практически для этой цели более удобным оказываются не  $W_m$ , а эквивалентный им набор  $2I$  величин, построенных определ. образом на основе  $W_m$ . В качестве таких величин обычно используют т. н. параметры ориентации  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 2I$ ), являющиеся полиномами от ср. значений степеней  $m$ :

$$\bar{m}^k = \sum_{m=-I}^{m=+I} W_m m^k, \quad (1)$$

Полностью  $f_i$  таковы, что для спиново-неупорядоченной совокупности ядер все  $f_i = 0$ , а для полностью спиново-упорядоченной совокупности ядер ( $W_{-I}, \dots, W_{I-1} = 0, W_I = 1$ ) все  $f_i = 1$ . Чётные параметры ( $f_1, f_2, \dots$ ) содержат только  $\bar{m}^k$  с чётными  $k$  и характеризуют ориентацию спинов в заданном направлении. Чётные параметры ( $f_2, f_4, \dots$ ) содержат только  $\bar{m}^k$  с чётными  $k$  и характеризуют ориентацию спинов вдоль заданной прямой, безотносительно к направлению на ней.

Наиболее важны и имеют простой смысл параметры  $f_1$  и  $f_2$ :

$$f_1 = \bar{m}/I, \\ f_2 = \frac{3}{I(2I-1)} \left[ \bar{m}^2 - \frac{I(I+1)}{3} \right]. \quad (2)$$

Параметр  $f_1$ , наз. *о л я р и з а ц и е й*, характеризует преимуществ. ориентацию спинов в заданном направлении ( $f_1 > 0$ ) или против него ( $f_1 < 0$ ). Параметр  $f_2$ , наз. *в ы с т р о е н н о с т ь ю*, характеризует преимуществ. ориентацию вдоль ( $f_2 > 0$ ) или поперёк ( $f_2 < 0$ ) выбранной оси (безотносительно к её направлению). Эти параметры достаточны для описания простейших процессов в системах ядер с произвольным спином, а для ядер с  $I = 1/2$  или  $I = 1$  дают полное описание ориентац. состояния.

В обычных условиях в веществах, встречающихся в природе, атомные ядра не ориентированы. Для получения О. я. разработаны спец. методы, основанные на наличии у ядер магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов, ориентационно жёстко связанных с ядерными спинами. При наложении на ядра магн. поля  $H$  взаимодействие поля с магн. моментом ядра  $m$  будет стремиться ориентировать  $m$  в направлении  $H$ , т. е. поляризовать систему ядер. Если ядра находятся в неоднородном электрич. поле, то его взаимодействие с квадрупольным электрич. моментом ядра  $Q$  будет приводить к выстраиванию ядерных спинов. Оба эти взаимодействия используются в статич. методах, когда ядерные спины находятся в тепловом равновесии с веществом образца. Если ср. энергия теплового движения превышает энергию взаимодействия ядерного момента с полем, то ориентирующее действие поля в анатич. степени подавляется тепловым движением. В связи с малостью ядерных моментов значит. ориентация ядерных спинов статич. методами удаётся получить лишь при очень низких температурах и в очень высоких полях. Так, при практической предельно достигнутой  $T \approx 10^{-2}$  К и  $H \approx 10^5$  Тл поляризация и выстроенность ядер со ср. магн. моментом, равным 1 ядерному магнетону, составляют:  $f_1 = 0,2$  и  $f_2 = 0,1$ .

Недостаточная величина ориентации ядер в этих условиях и трудности их реализации способствовали развитию косвенных методов ориентации ядерных спинов, в частности используют статич. ориентацию ядерных спинов во внутренних полях в веществе (электрич. и магнитных), к-рые в ряде случаев значительно превосходят достигшие внеш. поля. Так, на ядрах атомов нек-рых переходных элементов внутриатомные магн. поля достигают  $H = 10^8$  Тл. В молекулах с сильной асимметричными оболочками электрич. поле на ядрах имеет большую неоднородность. Для ориентации ядерных спинов во внутр. полях необходимо обеспечить чуждую пространств. ориентацию самих полей. В случае поляризации ядер во внутр. магн. полях ориентация этих полей достигается поляризацией (намагничиванием) электронных оболочек атома во внеш. магн. поле (это проще, чем получение ядерной поляризации, т. к. электронные магн. моменты более чем в  $10^3$  раз превосходят ядерные). Для выстраивания ядерных спинов в неоднородных внутр. электрич. полях используются монокристаллич. образцы, в к-рых асимметричные молекулы оказываются выстроенными. Этими методами при  $T \sim 10^{-2}$  К удаётся получать высокие степени поляризации ядер лантаноидов и группы Fe, а также высокую выстроенность ядер атомов некоторых актиноидов.

Для поляризации нек-рых ядер разработаны т. н. динамич. методы, когда тепловое равновесие ядерных спинов в веществе, находящемся в пост. магн. поле, нарушается путём возбуждения эл.-магн. поля переходов между Zeemanовскими подуровнями (см. *Ядерный магнитный резонанс*, *Электронный парамагнитный резонанс*). Обычно внеш. полем поляризуются электроны,

и надлежащим выбором возбуждаемых переходов электронная поляризация «прекращается» в систему ядерных спинов. Динамик. методы удаётся использовать лишь в веществах, удовлетворяющих ряду специфич. требований. Спин динамически поляризуемых ядер невисок, обычно  $I = 1/2$ .

Применяется также метод получения О. я. непосредственно в процессах ядерных реакций, когда исследуемые ядра поглощают или испускают частицы с определ. образом ориентированными спинами. При этом в силу закона сохранения момента кол-ва движения оказываются ориентированными и ядра, поглотившие или испустившие частицы. Т. к. ориентации (если не приняты меры) быстро разрушаются тепловым движением частиц, то обычно метод используется при исследованиях быстрых процессов.

О. я. применяются для изучения свойств ядер, связанных с его спином, взаимодействия ядер с разл. микроэлементами. С помощью поляризов. ядерных мишеней и пучков поляризов. частиц можно определить спиновую зависимость взаимодействия частиц с ядрами. Наблюдение распада возбужденных состояний О. я. даёт информацию о спинах, чётности, магн. и электрич. моментах как самих возбужденных состояний ядер, так и испускаемых микрочастиц. Исследования угл. распределения электронов при распаде поляризов. ядер  $^{60}\text{Co}$  привели к открытию нарушения пространств. чётности в слабых взаимодействиях. Из угл. распределения  $\gamma$ -излучения поляризов. ядер  $^{114}\text{C}$  —  $^{114}\text{Cd}$ , полученных в результате захвата поляризов. тепловых нейтронов неполяризов. ядрами  $^{113}\text{C}$  —  $^{113}\text{Cd}$ , впервые получена информация об универсальности слабого взаимодействия между микроэлементами. Ориентированные ядра, «уфнц», 1954, т. 53, в. 3; Д. Жеффрис К. Динамическая ориентация ядер, пер. с англ., М., 1955; Методы определения основных характеристик атомных ядер и элементарных частиц, сост.-ред. Л. К.-Л. Яан, Ву Цзин-сюан, пер. с англ., М., 1956. В. П. Адриэмичев.

**ОРШТЕЙНА — ЦЕРНИКЕ УРАВНЕНИЕ** — интегральное ур-ние, связывающее равновесную парную корреляц. ф-цию жидкости или газа  $n_2(r) = 1 + \chi_2(r)$  с прямой корреляц. ф-цией  $C(r)$ :

$$\chi_2(r) = C(r) + n \int \chi_2(r-r_1)C(r_1-r)dr_1,$$

где  $n$  — плотность числа частиц. О.—Ц. у. предложено Л. Орштейном (Л. S. Ornstein) и Ф. Цернике (F. Zernike) в 1914 в теории критич. рассеяния рентг. лучей.

О.—Ц. у.—точное соотношение между  $\chi_2(r)$  и  $C(r)$  и является определением последней. Оно соответствует алгебраич. соотношению  $\chi_k = \tilde{C}_k(1 - nC_k)^{-1}$  между фурье-образами  $\tilde{\chi}_k$  и  $\tilde{C}_k$  соответствующих корреляц. ф-ций. Удобство введения  $C(r)$  состоит в том, что она всегда остаётся близкойдействующей ф-цией, в отличие от  $\chi_2(r)$ , к-рая в критической точке становится дальностьюдействующей, поэтому  $C(r)$  более тесно связана с взаимодействием, чем  $\chi_2(r)$ . Для применения О.—Ц. у. его надо дополнить соотношением между  $C(r)$  и  $\chi_2(r)$ . В теории жидкости применяются разл. способы подобного замыкания О.—Ц. у., основанные на нек-рых методах отбора диаграмм ряда теории возмущений для парной корреляц. ф-ции (см. *Гиперцепное уравнение, Перкуса — Йенка уравнение*). Прямая корреляц. ф-ция определяет коэф. изотерм. упругости жидкости (или газа)  $n(\partial P/\partial n)_T$  ( $P$  — давление):

$$(kT)^{-1}(\partial P/\partial n)_T = 1 - n \int C(r)dr,$$

а ф-ция  $\chi_2(r)$  связана с коэф. сжимаемости  $n^{-1}(\partial n/\partial P)_T$ . О.—Ц. у. находит применение в разл. задачах теории флукутаций.

Лит.: Физика простых жидкостей, пер. с англ., М., 1971, гл. 2; Исихара А., Статистическая физика, пер. с англ., М., 1973, гл. 4, § 5 у. Р. Газволия и И. Мерцвильдер, статистическая механика, пер. с англ., т. 1, М., 1978, гл. 2. Д. Н. Зубарев.

**ОРШТЕЙНА — ЦЕРНИКЕ ФОРМУЛА** — определяет вид корреляц. ф-ции флукутаций плотности  $\delta n(r) = n(r) - \langle n(r) \rangle$  вблизи критической точки:

$$G(r) = \langle \delta n(0)\delta n(r) \rangle = (T/4\pi r^2) (\partial n/\partial \mu)_T r^{-4} \exp(-r/r_c).$$

Здесь  $T$  — абе. тем-ра в энергетич. единицах,  $\mu$  — хим. потенциал,  $r_c$  — радиус корреляции,  $\langle \dots \rangle$  означает усреднение по статистич. ансамблю. О.—Ц. ф. выведена в пренебрежении взаимовыгодными флукутаций и представляет собой частный случай выражения для корреляц. ф-ции параметра порядка в *Ландау теории фазовых переходов 2-го рода*. Флукутационная теория фазовых переходов показывает, что отличие истинного выражения для  $G(r)$  от О.—Ц. ф. невелико, если использовать точное, а не вычисленное в приближении теории Ландау значение  $r_c$ . В частности, критический показатель  $\eta$ , определяющий поведение  $G(r) \sim r^{-1+\eta}$ , при  $r \ll r_c$  весьма мал:  $\eta \sim 0,02$ .

Лит.: Ornstein L. S., Zernike F., Accidental deviations of density and opalescence at the critical point of a simple substance, «Proc. Kon. Akad. Wet.», 1914, v. 17, p. 793.

**ОРТОГОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ФУНКЦИЙ** (от греч. orthogónios — прямоугольный) — конечная или счётная система ф-ций  $\{\varphi_i(x)\}$ , принадлежащих (сепарабельному) гильбертову пространству  $L^2(a, b)$  (квадратно интегрируемых ф-ций) и удовлетворяющих условиям

$$\int \varphi_i(x)\varphi_j^*(x)g(x)dx = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq j, \\ \lambda_i > 0 & \text{при } i = j. \end{cases}$$

Ф-ция  $g(x)$  наз. весом О. с. ф., \* означает комплексное сопряжение. Если все  $\lambda_i = 1$ , то О. с. ф. наз. ортонормированной. О. с. ф. наз. полной, если для любой ф-ции  $f(x) \in L^2(a, b)$  существует ряд Фурье  $\sum c_n \varphi_n(x)$ , сходящийся к  $f(x)$ ; такой ряд будет единственным, а его коэф. определяются ф-лами Фурье

$$c_n = \lambda_n^{-1} \int \varphi_n^* g(x)dx = (f, \varphi_n).$$

Всякая линейно независимая (полная) система ф-ций приводится с помощью процедуры ортогонализации (см. *Ортогонализированная система векторов*) к (полной) нормированной О. с. ф.

Для всякого ряда Фурье, построенного по О. с. ф.  $\{\varphi_n(x)\}$ , выполняется неравенство Бесселя

$$\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2 \lambda_k \leq \|f\|^2 = (f, f),$$

а для полной О. с. ф. справедливо равенство Парсеваля

$$\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2 \lambda_k = \|f\|^2.$$

Примеры полных О. с. ф.:

- 1) тригонометрическая система ф-ций на отрезке  $[-1, 1]$ ,  $g(x) = 1$ :  
 $1/2, \cos nx, \sin nx$  ( $n = 1, 2, \dots$ );
- 2) системы ортогональных полиномов;
- 3) система Хаара  $\{\chi_n(x)\}_{n=0}^{\infty}$ ,  $x \in [0, 1]$ :  
 $\chi_1(x) = 1,$

$$\chi_m(x) = \begin{cases} 2^m & \text{при } x \in \left( \frac{2k-2}{2^{m+1}}, \frac{2k-1}{2^{m+1}} \right), \\ -2^m & \text{при } x \in \left( \frac{2k-1}{2^{m+1}}, \frac{2k}{2^{m+1}} \right), \\ 0 & \text{в остальных точках отрезка,} \end{cases}$$

$a, m = 2^n + k, 1 \leq k \leq 2^n, m = 2, 3, \dots$   
О. с. ф. используются в разл. физ. задачах. Спектральный анализ в теории колебаний, акустике, радиофизике

и оптике основан на разложении ф-ций в ряды по тригонометрич. системе. В любых задачах на собств. значения операторов также появляются О. с. ф., т. к. для эрмитова оператора  $\hat{H}$  собств. ф-ции, отвечающие разл. собств. значениям, ортогональны между собой. В квантовой механике, где квадрат модуля волновой ф-ции  $|\psi(x)|^2$  играет роль плотности распределения вероятности, свойство ортовормируемости отражает тот факт, что полная вероятность найти частицу в данном состоянии равна 1, если известно, что система находится в состоянии с определенным квантовым числом.

Лит.: Колмогоров А. Н., Фомин С. В., Элементы теории функций и функционального анализа, 5 изд., М., 1981; Шило в Г. В., Математический анализ. Функции одного переменного, ч. 3, М., 1979; Рунтманн А. В. Р., Принципы современной математической физики, пер. с англ., т. 1, М., 1982.

**ОРТОГОНАЛЬНЫЕ ПОЛИНОМЫ** — системы полиномов  $\{P_n(x)\}$ ,  $n = 0, 1, \dots$ , ортогональных с весом  $\rho(x) \geq 0$  на интервале  $(a, b)$ :

$$\int_a^b P_n(x) P_m(x) \rho(x) dx = \delta_{nm} d_n^2, \quad (1)$$

где  $d_n^2$  — квадрат нормы. Подобные системы возникают в разл. задачах матем. физики: в теории представлений групп, в вычислит. математике, при решении задач на собственные значения в теории волн, квантовой механике и др.

Задание веса  $\rho(x)$  и интервала  $(a, b)$  определяет полином  $P_n(x)$ , удовлетворяющий соотношению ортогональности (1) однозначно, с точностью до нормировочного множителя. Для полиномов  $P_n(x)$  справедливо след. явное выражение в виде определителя:

$$P_n(x) = A_n \begin{vmatrix} c_0 & c_1 \dots c_n \\ c_1 & c_2 \dots c_{n-1} \\ \dots & \dots \\ c_{n-1} & c_n \dots c_{n-1} \\ 1 & x \dots x^{n-1} \end{vmatrix},$$

где  $A_n$  — нормировочная постоянная,  $c_k = \int_a^b x^k \rho(x) dx$  —

момент весовой ф-ции  $\rho(x)$ . Из соотношений ортогональности (1) можно получить ин. свойства О. п. Напр.: полином  $P_n(x)$  ортогонален произвольному полиному меньшей степени; для произвольных О. п. справедливы рекуррентная ф-ла, связывающая три последоват. полинома  $P_{n-1}(x)$ ,  $P_n(x)$ ,  $P_{n+1}(x)$ ,

$$x P_n(x) = \alpha_n P_{n+1}(x) + \beta_n P_n(x) + \gamma_n P_{n-1}(x),$$

где  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ ,  $\gamma_n$  — постоянные.

Классические О. п. — полиномы Якоби, Лагерра и Эрмита, часто встречающиеся в теоретич. и матем. физике. Классич. О. п. удовлетворяют ур-ниям вида

$$\sigma(x) y'' + \tau(x) y' + \lambda y = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma(x)$  — полином степени не выше 2,  $\tau(x)$  — полином степени не выше 1,  $\lambda$  — постоянная. Ур-ние (2) можно записать в самосопряженном виде

$$[\sigma(x)\rho(x)y']' + \lambda\rho(x)y = 0, \quad (3)$$

где ф-ция  $\rho(x)$  удовлетворяет ур-нию

$$[\sigma(x)\rho(x)]' = \tau(x)\rho(x).$$

При значеннях

$$\lambda = \lambda_n = -n\tau' - n(n-1)\sigma''/2, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

ур-ние (2) имеет полиномиальные решения  $y = y_n(x)$ , к-рые можно представить в виде ф-лы Родрига

$$y_n(x) = \frac{B_n}{\rho(x)} \frac{d^n}{dx^n} [\sigma^n(x)\rho(x)], \quad (4)$$

где  $B_n$  — нормировочная постоянная.

Т. к. производные от решений ур-ния (2) также удовлетворяют ур-нию того же вида, то получаем ф-лу Родрига для производных от полиномов  $y_n(x)$ :

$$y_n^{(m)}(x) = \frac{A_m B_n}{\sigma^m(x)\rho(x)} \frac{d^{n-m}}{dx^{n-m}} [\sigma^m(x)\rho(x)],$$

$$A_{mn} = \frac{n!}{(n-m)!} \prod_{k=0}^{m-1} \left( \tau' + \frac{n+k-1}{2} \sigma' \right), \quad A_{0n} = 1.$$

При помощи линейной замены независимой переменной, не меняющей вида ур-ния (2), полиномы  $y_n(x)$ , ф-ция  $\sigma(x)$  и  $\rho(x)$  можно привести к след. канонич. видам.

1) Полиномы Якоби:

$$y_n(x) = P_n^{(\alpha, \beta)}(x) = \frac{(-1)^n n!}{2^n n!} (1-x)^{-\alpha} (1+x)^{-\beta} \frac{d^n}{dx^n} [(1-x)^{\alpha+1} (1+x)^{\beta+1}],$$

$$\sigma(x) = 1-x^2, \quad \rho(x) = (1-x)^\alpha (1+x)^\beta.$$

Частными случаями полиномов Якоби являются: а) полиномы Лежандра  $P_n(x) = P_n^{(0,0)}(x)$ ;

б) полиномы Чебышева 1-го и 2-го рода

$$T_n(x) = \frac{n!}{(n/2)!} P_n^{(-1/2, -1/2)}(x) = \cos n\varphi,$$

$$U_n(x) = \frac{n+1!}{(n/2)!} P_n^{(1/2, 1/2)}(x) = \frac{\sin(n+1)\varphi}{\sin\varphi},$$

φ = arccos x;

в) полиномы Гегенбауэра (ультрагипергеометр. полиномы)

$$C_n^\lambda(x) = \frac{(2\lambda)_n}{(\lambda+1/2)_n} P_n^{\lambda-1/2, \lambda-1/2}(x).$$

Здесь  $(\alpha)_n = \alpha(\alpha+1)\dots(\alpha+n-1)$ ,  $(\alpha)_0 = 1$ .

Через полиномы Якоби можно выразить также сферические гармоник и обобщенные сферич. ф-ция (Визнера функции).

2) Полиномы Лагерра:

$$y_n(x) = L_n^\lambda(x) = \frac{1}{n!} e^{-x} x^\lambda \frac{d^n}{dx^n} (e^x x^\lambda),$$

$$\sigma(x) = x, \quad \rho(x) = x^\lambda e^{-x}.$$

3) Полиномы Эрмита:

$$y_n(x) = H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x^2}), \quad \sigma(x) = 1, \quad \rho(x) = e^{-x^2}.$$

Ф-лы дифференцирования для полиномов Якоби, Лагерра и Эрмита:

$$\frac{d}{dx} P_n^{(\alpha, \beta)}(x) = \frac{1}{2} (n + \alpha + \beta + 1) P_{n-1}^{(\alpha+1, \beta+1)}(x),$$

$$\frac{d}{dx} L_n^\lambda(x) = -L_{n-1}^{\lambda+1}(x), \quad \frac{d}{dx} H_n(x) = 2n H_{n-1}(x).$$

Если полином  $\sigma(x)$  имеет кратные корни, т. е.  $\sigma(x) = (x-a)^k$ , то соответствующие полиномы  $y_n(x)$  можно выразить через полиномы Лагерра:

$$y_n(x) = C_n(x-a)^k L_n^\alpha \left( \frac{\tau(x)}{x-a} \right), \quad \alpha = -\tau' - 2n + 1$$

( $C_n$  — нормировочная постоянная). Полиномы  $y_n(x)$ , для к-рых ф-ция  $\rho(x)$  удовлетворяет условию

$$\sigma(x)\rho(x)x^k|_{x=a, b} = 0 \quad (5)$$

( $a, b$  — вещественные числа;  $k = 0, 1, \dots$ ), ортогональны с весом  $\rho(x)$  на интервале  $(a, b)$ , т. е.

$$\int_a^b y_m(x) y_n(x) \rho(x) dx = \delta_{mn} d_n^2.$$

Отсюда следует, что полиномы Якоби  $P_n^{(\alpha, \beta)}(x)$  ортогональны с весом  $(1-x)^\alpha (1+x)^\beta$  на интервале  $(-1, 1)$

при  $\alpha > -1, \beta > -1$ ; полиномы Лагерра  $L_n^{(\alpha)}(x)$  — с весом  $x^\alpha e^{-x}$  на интервале  $(0, \infty)$  при  $\alpha > -1$ , полиномы Эрмита  $H_n(x)$  — с весом  $\exp(-x^2)$  на интервале  $(-\infty, \infty)$ .

В случае выполнения условия (5) полиномы  $y_n(x)$  наз. классическими О. п. Обычно эти полиномы рассматривают при доп. условии  $\sigma(x) > 0$ . Производные классич. О. п.  $y_n^{(k)}(x)$  также являются классич. О. п., к-рые ортогональны с весом  $\rho_k(x) = \sigma^k(x)\rho(x)$  на интервале  $(a, b)$ :

$$\int_a^b y_n^{(k)}(x) y_m^{(k)}(x) \rho_k(x) dx = \delta_{nm} a_k^2.$$

Системы классич. О. п. замкнуты для непрерывных ф-ций  $f(x)$ , удовлетворяющих условию квадратичной интегрируемости, т. е. из равенств

$$\int_a^b f(x) y_n(x) \rho(x) dx = 0, \quad n = 0, 1, \dots,$$

следует, что  $f(x) = 0$  при  $x \in (a, b)$  для любых непрерывных ф-ций  $f(x)$ , удовлетворяющих условию  $0 < \int_a^b f^2(x) \rho(x) dx < \infty$ .

Если ф-ция  $\rho(x)$  на интервале  $(a, b)$  является отрицательной и положительным решением ур-ния  $(\sigma y)' = \tau \rho$ , удовлетворяющим условию (5), то нетривиальные решения  $y = y(x)$  ур-ния (3), для к-рых ф-ция  $y(x)\rho^{1/2}(x)$  ограничена и квадратично интегрируема на интервале  $(a, b)$ , существуют только при

$$\lambda = \lambda_n = -n\tau' - n(n-1)\sigma''/2, \quad n = 0, 1, \dots,$$

и имеют вид

$$y_n(x, \lambda_n) = y_n(x) = B_n [\sigma^n(x)\rho(x)]^{(n)}/\rho(x),$$

т. е. совпадают с классич. О. п. Если  $a$  и  $b$  конечны, то требование квадратичной интегрируемости можно опустить.

В табл. 1 приведены осн. характеристики полиномов Якоби, Лагерра и Эрмита.

Табл. 1.

$y_n(x)$	$P_n^{(\alpha, \beta)}(x), \alpha > -1, \beta > -1$	$L_n^{(\alpha)}(x), \alpha > -1$	$H_n(x)$
$(a, b)$	$(-1, 1)$	$(0, \infty)$	$(-\infty, \infty)$
$\rho(x)$	$(1-x)^\alpha(1+x)^\beta$	$x^\alpha e^{-x}$	$e^{-x^2}$
$\sigma(x)$	$1-x^2$	$x$	$1$
$\tau(x)$	$\beta - \alpha - (\alpha + \beta + 2)x$	$1 + \alpha - x$	$-2x$
$\lambda_n$	$n(n + \alpha + \beta + 1)$	$n$	$2n$
$B_n$	$(-1)^n / 2^n n!$	$1/n!$	$(-1)^n$
$a_n^2$	$\frac{2^{n+\beta+1} \Gamma(n+\alpha+1) \Gamma(n+\beta+1)}{n! (2n+\alpha+\beta+1) \Gamma(n+\alpha+\beta+1)}$	$\frac{\Gamma(n+\alpha+1)}{n!}$	$2^n n!^{1/2}$

Здесь  $\Gamma(x)$  — гамма-функция.

Производные ф-ций для полиномов Якоби, Лагерра и Эрмита:

$$2^{n+\beta} P_n^{-1}(1-t+R)^{-\alpha}(1+t+R)^{-\beta} = \sum_{k=0}^n P_k^{(\alpha, \beta)}(x) t^k,$$

$$R = (1-2tx+t^2)^{1/2}, \quad |t| < 1;$$

$$(1-t)^{-\alpha-1} \exp\left(-\frac{xt}{1-t}\right) = \sum_{k=0}^{\infty} L_k^{(\alpha)}(x) t^k, \quad |t| < 1;$$

$$\exp(2xt - t^2) = \sum_{k=0}^{\infty} H_k(x) t^k / k!$$

Асимптотич. представления при  $n \rightarrow \infty$

$$P_n^{(\alpha, \beta)}(\cos \theta) \approx \frac{\cos[(n + (\alpha + \beta + 1)/2)\theta - (2\alpha + 1)\pi/4]}{(\pi n)^{1/2} (\sin(\theta/2))^{2\alpha+1/2} (\cos(\theta/2))^{2\beta+1/2}},$$

$$0 < \delta \leq \theta \leq \pi - \delta,$$

$$L_n^{(\alpha)}(x) \approx \pi^{-1/2} e^{-x/2} x^{-\alpha/2} (1-x)^{-1/2} \cos[2(n+1/2)x - (2\alpha+1)\pi/4],$$

$$0 < \delta \leq x \leq N < \infty,$$

$$H_n(x) \approx 2^{n/2} (2n/e)^{n/2} e^{x^2/4} \cos(x\sqrt{2n} - \pi n/2),$$

$$|x| \leq N < \infty.$$

Классические О. п. дискретной переменной. Заменим (2) разностным ур-нем второго порядка точности по  $h$  на сетке  $x = x(s)$  с переменным шагом  $\Delta x = x(s+1) - x(s)$ . После замены  $s$  на  $hs$  получим

$$\sigma(x) \frac{\Delta}{\Delta x(s-1/2)} \left[ \frac{\psi(x)}{\psi(x)} \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{\psi(x)}{\Delta x(s)} + \frac{\psi(x)}{\Delta x(s)} \right] + \lambda y(s) = 0, \quad (6)$$

где  $\Delta y(s) = y(s+1) - y(s)$ ,  $\nabla y(s) = y(s) - y(s-1)$ . Для сеток

$$x = \begin{cases} as^2 + bs + c, \\ C_1 q^s + C_2 q^{2s} + C_3 \end{cases}$$

( $a, b, c, C_1, C_2, C_3$  — постоянные), к-рые линейными преобразованиями  $x(s) \rightarrow c_1 x(s) + c_2$ ,  $s \rightarrow \pm s + c$  можно привести к канонич. видам

$$x(s) = \begin{cases} s \\ s(s+1) \\ \exp(2\omega s), \operatorname{sh}(2\omega s), \operatorname{ch}(2\omega s) \\ \cos(2\omega s) \end{cases}$$

( $\omega$  — постоянная), выполняется простое свойство, аналогичное осн. свойству ур-ния (2): в результате разностного дифференцирования (6) получается ур-не того же типа.

При опред. значениях  $\lambda = \lambda_n$  ур-ие (6) имеет частные решения  $y(s) = \tilde{y}_n(x(s))$ , где  $\tilde{y}_n(x)$  — полином степени  $n$  относительно переменной  $x$ . Полиномиальные решения  $y(s) = \tilde{y}_n(x)$ ,  $x = x(s)$  ур-ния (6) дают с разностным аналогом ф-лы Родрига:

$$\tilde{y}_n(x) = \frac{B_n}{\rho(x)} \nabla^{(n)} [\rho_n(s)], \quad (7)$$

где  $B_n$  — постоянная,  $\rho_n(s) = \rho(s+n) \prod_{i=1}^n (\sigma(s+i))$ , ф-ция  $\rho(s)$  — решение ур-ния

$$\frac{\Delta}{\Delta x(s-1/2)} [\sigma(s)] \rho(s) = \tau(s) \rho(s)$$

при

$$\sigma(s) = \tilde{\sigma}[x(s)] - 2^{-1} \tilde{\tau}[x(s)] \Delta x(s - 1/2),$$

$$\tau(s) = \tilde{\tau}[x(s)],$$

$$\nabla^{(n)} = \left( \frac{\nabla}{\nabla x} \right) \left( \frac{\nabla}{\nabla x} \right) \dots \left( \frac{\nabla}{\nabla x} \right),$$

$$xk(s) = x(s+k/2), \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Нек-рые из этих решений имеют самостоят. значение и используются в квантовой механике, теории представлений групп, вычислит. математике, теории вероятностей.

Ф-ла, аналогичная (7), справедлива для разностных производных от полиномиальных решений ур-ния (6). С помощью (7) можно получить ф-лы разностного дифференцирования, свойства симметрии и ряд других свойств полиномов  $\tilde{y}_n(x)$ .

При выполнении условий

$$\sigma(s)\rho(s)xk(s-1/2) \Big|_{s=a,b} = 0, \quad k = 0, 1, \dots$$

полнономальные решения  $\tilde{y}_m(x)$  и  $\tilde{y}_n(x)$  ур-ния (6) при  $\lambda_m \neq \lambda_n$  ортогональны в смысле суммы:

$$\sum_{j=0}^{n-1} \tilde{y}_m(x_j) \tilde{y}_n(x_j) \rho(x_j) \Delta x (s_1 - s_1 - 1/2) = \delta_{mn} a_n^2, \quad (8)$$

$$x_1 = x(s_1).$$

Решения (7), для  $k$ -рых справедливо свойство (8) (причем на отрезке  $[a, b - 1]$  ф-ция  $\rho(x)$  не меняет знак, ф-ция  $x(s) - \text{монотонна}$ ), наа. классич. О. п. дискретной переменной на неравномерных сетках.

Т. к. свойство ортогональности (8) для классич. О. п. дискретной переменной получается на свойства ортогональности для произвольных О. п. в результате замены определенного интеграла на сумму, то для полиномов  $y_n(x, s)$  при соответствующем определении скалярного произведения ( $\tilde{y}_m, \tilde{y}_n$ ) сохраняются все общие свойства произвольных О. п.  $p(x)$ . В частности, справедливо рекуррентное соотношение. Среди полиномиальных решений ур-ния (6) наиб. известны полиномы Хана  $h_n^{(\alpha, \beta)}(x, N)$ , полиномы Мейкхенера  $m_n^{(\gamma, \mu)}(x)$ , полиномы Кравчука  $k_n^{(p)}(x, N)$  и полиномы Шарлье  $c_n^{(\nu)}(x)$  (случай линейной сетки  $x(s) = s$ ; табл. 2).

Табл. 2.

$y_n(x)$	$h_n^{(\alpha, \beta)}(x, N)$	$m_n^{(\gamma, \mu)}(x)$	$k_n^{(p)}(x, N)$	$c_n^{(\nu)}(x)$
$(a, b)$	$(0, N)$	$(0, \infty)$	$(0, N + 1)$	$(0, \infty)$
$\rho(x)$	$\frac{\Gamma(\alpha + N - x)\Gamma(\beta + x + 1)}{\Gamma(N - x)\Gamma(\beta + 1)}$ $\alpha > -1, \beta > -1$	$\frac{\mu^x \Gamma(x + 1)}{\Gamma(x + 1)\Gamma(\nu)}$ $(\gamma > 0, 0 < \mu < 1)$	$\frac{\Gamma(x + 1)\Gamma(N - x + 1)}{N! p^x q^{N-x}}$ $(p > 0, q > 0, p + q = 1)$	$\frac{e^{-\mu x}}{x!}$ $(\mu > 0)$
$\sigma(x)$	$x(\alpha + N - x)$	$x$	$x$	$x$
$\tau(x)$	$(\beta + 1)(N - 1) - (\alpha + \beta + 2)x$	$\gamma\mu - (1 - \mu)x$	$(pN - x)/q$	$\mu - x$
$\lambda_n$	$n(\alpha + \beta + n + 1)$	$n(1 - \mu)$	$n/q$	$n$
$B_n$	$(-1)^n/n!$	$\mu^{-n}$	$(-1)^n q^n/n!$	$\mu^{-n}$
$d_n^2$	$\frac{\Gamma(\alpha + n + 1)\Gamma(\beta + n + 1)\Gamma(\alpha + \beta + n + N + 1)}{(\alpha + \beta + 2n + 1)n!\Gamma(\alpha + \beta + n + 1)\Gamma(N - n - 1)}$	$\frac{n! \nu^n}{\mu^n (1 - \mu)^n}$	$\frac{n!(pq)^n}{n!(N - n)!}$	$n! \mu^{-n}$

Через классич. О. п. дискретной переменной на линейной и квадратичной сетке выражаются матричные элементы представлений группы трёхмерных вращений, коэф. Клебана — Гордана и коэф. Рака.

Классич. О. п. как непрерывного, так и дискретного аргумента можно изразить через *гипергеометрические функции* и их обобщения.

Даль. Вейтген Г. Эрдей А. Высшие трансцендентные функции, пер. с англ., 2 изд., т. 1, 1973; Суэтин П. К., Классические ортогональные многочлены, 2 изд., М., 1979; Ни и и форо А. Ф., Уваров В. Б., Специальные функции математической физики, 2 изд., М., 1984; Ни и форо А. Ф., Суэтин С. К., Уваров В. Б., Классические ортогональные полиномы дискретной переменной, М., 1985.

**ОРТО- И ПАРАСОСТОЯНИЯ** — энергетич. состояния квантовой системы, состоящей из частиц, spins  $k$ -рых параллельны (орто состояние) и антипараллельны (парасостояние). В системе, состоящей из двух фермионов и находящейся в ортосостоянии, полный спин  $S = 1$ , а в системе, находящейся в парасостоянии,  $S = 0$ . Т. к. по отношению к перестановкам частиц полная волновая ф-ция фермионов антисимметрична, её координатная часть при этой операции умножается на  $(-1)^S$ . Отсюда следует, что при чётном (нечётном) полном спине система из двух фермионов может иметь только чётный (нечётный) орбитальный момент.

Термин «О.- и п.» чаще применяется к двухатомным молекулам с одинаковыми ядрами. Напр.: ортоводородная молекула  $H_2$  с параллельными спинами ядер и полным ядерным спином  $I = 1$ ; параводород — молекула  $H_2$  с антипараллельными спинами ядер и  $I = 0$ . Молекулы ортоводорода и параводорода

практически не взаимодействуют друг с другом и ведут себя как разл. модификации вещества с близкими свойствами.

Термин «О.- и п.» ранее применялся также для атома Не (ортогелий, парагелий). Эти состояния Не считались его разл. модификациями, т. к. переходы между сигнлетной системой уровней энергии Не (парасостояния) и триплетными (ортосостояния) — *интеркомбинационные квантовые переходы* — ранее не наблюдались.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Квантовая механика, 4 изд., М., 1989.

**ОРТОНОРМИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЕКТОРОВ** — множество ненулевых векторов  $\{x_i\}$  векторного пространства  $X$  со скалярным произведением  $(x_i, x_j) = \delta_{ij}$ , где символы Кронекера  $\delta_{\alpha\beta} = 0$  при  $\alpha \neq \beta$  и  $\delta_{\alpha\alpha} = 1$  при  $\alpha = \beta$ . О. с. в. наз. *полной*, если для любого

$f \in X$  ряд  $\sum_{i=1}^{\infty} x_i (f, x_i)$  сходится по норме к  $f$ . Полная

О. с. в. наз. *базисом* пространства  $X$ . Числа  $f_i = (f, x_i)$  наз. *коэф.* Фурье  $f$  относительно О. с. в.  $\{x_i\}$ . Для полной О. с. в. выполнено равенство

Парсеваля:  $(f, f) = \sum_{i=1}^{\infty} |f_i|^2$ . *Гильбертово пространство* является сепарабельным (т. е. содержит всюду плотное счётное подмножество) тогда и только тогда, когда в нём существует полная О. с. в.

Для всякой линейно независимой системы векторов  $\{a_i\}$  сепарабельного гильбертова пространства можно построить базис  $\{b_i\}$ . Процесс построения О. с. в. наз. *ортогонализацией* системы  $\{a_i\}$ , он применим к конечной и к счётной системе векторов:  $b_i = a_i + \sum_{j=1}^i \alpha_j b_j$ , где  $\alpha_j = -(a_{i+1}, b_j) / (b_j, b_j)$ .

Нормировав полученную систему  $\{b_j\}$ , получим искомую О. с. в. Др. источником О. с. в. являются эрмитовы *линейные операторы*, т. к. соевств. векторы эрмитова оператора, соответствующие разл. соевств. значениям, ортогональны. Поэтому для каждого эрмитова оператора существует О. с. в., состоящая из его соевств. векторов.

Важный пример О. с. в. — базис гильбертова пространства  $l^2$ , состоящего из векторов  $x$  вида  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots)$ , где  $(x, x) = \sum_{n=1}^{\infty} |\alpha_n|^2 < \infty$ . Т. к. любое сепарабельное

гильбертово пространство изоморфно либо конечномерному *евклидову пространству*, либо пространству  $l^2$ , для О. с. в.  $l^2$  выполнены те же свойства, что и для ортогональной системы функций.

Л. О. Чекуе, **ОСВЕЩЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ** — фотометрич. величина, характеризующая энергию оптич. излучения, распространяющегося от источника излучения в данном направлении внутри малого телесного уг-

ла в пределах некоторого интервала времени  $t$ . Определяется интегралом силы излучения  $I_e$  по времени  $t$ :

$$O_n = \int_0^t I_e dt;$$

единица измерения — Дж·ср<sup>-1</sup>. В системе световых величин аналогичная величина — освещенность; единица — календа-секунда (кд·с). А. А. Волженин.

**ОСВЕЩЕННОСТЬ** — световая величина, определяемая отношением светового потока  $d\Phi$ , падающего на малый участок поверхности, к площади  $dA$  этого участка:  $E_p = d\Phi/dA$ . Единица измерения  $O$ . — люкс.  $O$ . связана фотографич. законами с др. световыми величинами, напр. с силой света  $I$  точечного источника, удаленного от заданной точки на расстояние  $l$ ,  $O$ . связана соотношением  $E = I \cos \theta / l^2$ , где  $\theta$  — угол падения света. Понятием « $O$ .» пользуются в осв. в светотехн. расчётах при нормировании  $O$ . объектов. А. С. Добычин.

**ОСИ ИНЕРЦИИ** главные — три взаимно перпендикулярные оси, проведенные через к-н. точку тела, совпадающие с осями эллипсоида инерции тела в этой точке. Главные  $O$ . и. обладают тем свойством, что если их принять за координатные оси, то центробежные моменты инерции тела относительно этих осей будут равны нулю. Если одна из координатных осей, напр. ось  $Oz$ , является для точки  $O$  главной  $O$ . и., то центробежные моменты инерции, в индексы к-рых входит наименьшее этой оси, т. е.  $I_{xy}$  и  $I_{xz}$ , равны нулю. Если твёрдое тело, закреплённое в одной точке, приведено во вращение вокруг оси, к-рая в данной точке является главной  $O$ . и., то тело при отсутствии внеш. сил будет продолжать вращаться вокруг этой оси; как вокруг неподвижной. Главные  $O$ . и. тела в центре масс тела наз. центральными и главными  $O$ . и. тела.

**ОСКОЛКИ ДЕЛЕНИЯ** — атомы ядра, образующиеся в результате деления ядер и последующих превращений. Деление всех тяжёлых ядер (<sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>243</sup>Am, <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th) под действием нейтронов характеризуется почти одинаковым распределением  $O$ . д. по массам. Диапазон массовых чисел  $A$  от 70 до 165. Распределение осколков имеет 2 максимума при  $A = 95$  и  $A = 140$  (см. рис. 7 в ст. Деление ядер). Периоды полураспада радиоактивных  $O$ . д. — от неск. с до 10<sup>6</sup> лет. Энергия, излучаемая  $O$ . д., — от сотен кэВ до деск. Мэв.

В момент образования осколки находятся в возбуждённом состоянии. Возбуждение снимается («испарением» нейтронов и излучением  $\gamma$ -квантов. После испарения т. и. м. г. н. в. о. н. в. нейтронов  $O$ . д. испытывают в ср. 3—4 акта  $\beta$ -распада. Нек-рая доля ядер, образующихся при  $\beta$ -распаде  $O$ . д., находится в сильновозбуждённом состоянии с энергией, большей энергии связи нейтрона в ядре. Это приводит к испусканию т. н. запядающих нейтронов, играющих важную роль в процессе работы ядерных реакторов.

Лит.: Гусев Н. Г., Защита от гамма-излучения продуктов деления, М., 1968; Бета-излучение продуктов деления, М., 1978.

**О. Д. Космический**

**ОСЛАБИТЕЛЬ СВЕТА** — оптич. устройство, предназначенное для ослабления светового потока или (в общем случае) потока излучения.  $O$ . с. изготавливают в виде сеток, диафрагм, рассеивающих пластин, вращающихся дисков с вырезами, твёрдых, жидких или газообразных поглощающих (абсорбирующих) световых трубок, интерференц. световых фильтров, калыее фотометрических.  $O$ . с. — не изменяющие относительного спектрального распределения проходящего через них света, наз. нейтральными (неселективными), изменяющие — наз. селективными. Последние служат для исправления спектрального состава или яркости излучения, в частности для выделения широких или узких участков спектра или их исключения.  $O$ . с. применяются при световых измерениях и в спектрометрии (напр., для уравнивания интенсивности световых пучков или изменения спектральной чувствительности приёмников), а также в полиграфии и др.

Лит.: Эпштейн М. И., Измерения оптического излучения в электронике, М., 1980.

Д. Н. Лазарев

**ОСЛАБИТЕЛЬ ПОКАЗАТЕЛЬ** (экстинкция показателя среды) — величина, обратная расстоянию, на к-ром поток излучения, образующий параллельный пучок, ослабляется за счёт поглощения и рассеяния света в среде в 10 раз (десятичный  $O$ . п.) или в  $e$  раз (натуральный  $O$ . п.).  $O$ . п. — сумма показателей поглощения и рассеяния среды.  $O$ . п. зависит от спектра излучения, а при большой интенсивности потока — и от её величины (см. Нелинейная оптика). См. также Оптическая толщина.

**ОСМИЙ** (Osmium), Os, — хим. элемент VIII группы периодич. системы элементов Менделеева, ат. номер 76, ат. масса 190,2, относится к платиновой группе благородных металлов. Природный  $O$ . представляет собой смесь 7 изотопов: <sup>184</sup>Os, <sup>186</sup>Os — <sup>190</sup>Os, <sup>192</sup>Os, причём преобладает <sup>192</sup>Os (41,0%), а наим. распространены <sup>184</sup>Os (0,02%). <sup>198</sup>Os слабо  $\alpha$ -радиоактивен ( $T_{1/2} = 2,0 \cdot 10^{15}$  лет), а остальные изотопы стабильны. Металлич. радиус 0,135 нм, радиус иона Os<sup>4+</sup> 0,065 нм. Электронная конфигурация внеш. электронных оболочек 5s<sup>2</sup>5p<sup>6</sup>5d<sup>6</sup>6s<sup>2</sup>. Энергии последоват. ионизации 8,7, 17 и 25 эВ. По окисл. средству к электропу 1,44 эВ. Значение электроотрицательности 1,52.

В свободном виде  $O$ . — серебристо-голубоватый металл, решётка гексагональная плотноупакованная, параметры решётки  $a = 0,275$  и  $c = 0,432$  нм. Плотность  $O$ . 22,81 кг/дм<sup>3</sup>,  $t_{пл}$  ок. 3030—3040 °C,  $t_{кип}$  ок. 5000 °C. Телота плавления 31,8 кДж/моль, телота испарения 750 кДж/моль, уд. телотемкость  $c_p = 24,7$  Дж/(моль·K). Темп-ра Дебая 500 K, темп-ра перехода в сверхпроводящее состояние 0,71 K (при напряжённости магн. поля 0,817 А/м). Работа выхода электрона 4,7 эВ. Коэф. линейного теплового расширения (6,1—6,8) · 10<sup>-7</sup> (при 273—323 K). Уд. электрич. сопротивление 0,0966 мкОм·м (при 298 K), термич. коэф. электрич. сопротивления 4,20 · 10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup> (при 273—373 K). Теплопроводность 86 Вт/(м·K) (при 300—500 K). Один из самых твёрдых металлов, твёрдость по Бриггеллю 3,5—3,9 ГПа. Модуль упругости 555—570 ГПа, модуль сдвига 215,7 ГПа.

В соединениях проявляет чаще всего степени окисления +4, +6 и +8. Из тяжёлых платиновых металлов наиб. химически активен, в мелкораздробленном состоянии окисляется кислородом воздуха при комнатной темп-ре. Лучший оксид OsO<sub>4</sub> токсичен, обладает неприятным запахом.

$O$ . — компонент сверхтвёрдых и взрывостойких сплавов (с Ir, V и др. металлами), к-рые используются в приборостроении, для изготовления эталонов и т. д.  $O$ . и его соединения служат катализаторами хим. реакций. Искусств.  $\beta$ -радиоактивный <sup>187m</sup>Os ( $T_{1/2} = 15,4$  сут) используют в качестве радиоактивного индикатора.

С. С. Берёзовский.

**ОСМОС** (от греч. *osmōs* — толчок, давление) — самопроизвольный переход вещества через полупроницаемую перегородку (мембрану), разделяющую два раствора разл. концентрации или раствор и чистый растворитель.  $O$ . приближает систему к равновесию путём выравнивания концентраций по обе стороны перегородки. Он обусловлен понижением химического потенциала в присутствии растворённого вещества. Стремится выравниванию хим. потенциалов всех своих частей, система переходит в состояние с более низким уровнем свободной энергии при осмотич. переносе вещества.

Наиб. важный случай  $O$ . — переход молекул чистого растворителя в раствор через полупроницаемую перегородку, не пропускающую молекулы растворённого вещества. В этом случае происходит переход молекул из чистого растворителя в раствор, концентрация к-рого при этом повышается. В общем случае двух растворов  $A$  и  $B$  разной концентрации (концентрация раствора  $A$  больше, чем  $B$ ) возникает поток вещества от  $A$  к  $B$ . Этот поток можно предотвратить, если повысить дав-



ление в растворе *B*, причём разность давлений  $\pi$  по обе стороны перегородки при этих условиях наз. осмотическим давлением  $\pi$ , а достигнутое термодинамическое равновесие — осмотич. равновесие. Значение  $\pi$  зависит от состава раствора и темп-ры и для разбавленных и идеальных растворов не зависит от растворённого вещества, а определяется лишь числом «кинетич. элементов» — атомов, ионов, молекул — в единице объёма раствора.

Если *A* — чистый растворитель, а *B* — идеальный раствор неэлектролита (недиссоциирующего вещества), то

$$\pi V = -RT \ln(1 - z),$$

где *V* — молярный объём растворителя, *z* — молярная доля растворённого вещества. Для разбавленных растворов ( $z \ll 1$ ) неэлектролитов

$$\pi = cRT,$$

где *c* — молярность раствора. Из этого ур-ния (ур-ния состояния Вант-Гоффа), совпадающего по форме с ур-нием Бойля — Мариотта для идеального газа, следует, что  $\pi$  численно равно парциальному давлению, к-рое оказывало бы растворённое вещество в состоянии идеального газа при той же темп-ре, занимая объём, равный объёму раствора. Для разбавленных растворов электролитов

$$\pi = icRT,$$

где  $i = 1 + \alpha(v - 1)$ ,  $\alpha$  — степень диссоциации, *v* — число ионов, на к-рые распадется молекула электролита; коэф. *i* наз. коэффициентом Вант-Гоффа.

Растворы с одинаковыми  $\pi$  наз. изотоническими (из осмотическими). Так, кровезаместители в физиологич. растворах должны быть изотоничны по отношению к жидкостям организма. Если раствор имеет относительно др. раствора более высокое осмотич. давление, то он наз. гипертоническим, при обратном соотношении — гипотоническим.

Осмотич. давление измеряют с помощью осмометров. Различают статич. и динамич. методы измерений. Первый основан на измерении избыточного гидростатич. давления  $\Delta p$  по высоте столба жидкости *H* в трубке осмометра (рис.) после установления осмотич. равновесия и при равестве внутр. давлений в камерах *A* и *B*. Вторым методом основан на измерении скорости всасывания и выдавливания растворителя при разл. значениях  $\Delta p$  с последующей интерполяцией полученных данных к  $v = 0$  и  $\Delta p = \pi$ . В качестве мембраны обычно применяют плёнки из цел-

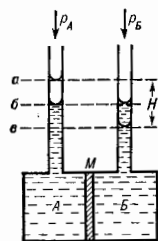


Схема осмометра: *A* — камера с раствором, *B* — камера с растворителем, *M* — мембрана; уровни жидкости в трубках при осмотическом равновесии *a* и *a'* в условиях равенства внешних давлений в камерах *A* и *B* (столб жидкости *H* уравновешивается  $\pi$ ); *b* — в условиях, когда  $\Delta p = \pi$ .

люфана, полупров., пористые керамиц. п стеклянные перегородки.

*O.* играет большую роль в тканях растений и животных, способствуя оводнению клеток и межклеточных структур, его используют для очистки высокомолекулярных соединений от низкомолекулярных примесей. Осн. применение осмометрии — определение мол. масс полимеров.

Лит.: Курс физической химии, под ред. Я. И. Герасимова, 2 изд., т. 1—2, М., 1969—75.

**ОСНОВНОЕ СОСТОЯНИЕ** а т о м а — стационарное квантовое состояние с наименьшей внутр. энергией.

Электроны атома в *O.* с. заполняют квантовые уровни (электронные оболочки) согласно Паули принципу. Уровень энергии, соответствующий *O. с.*, также наз. основным. Для атома с одним электроном во внеш. оболочке он определяется квантовыми числами этого электрона; в атомах с нек. эквивалентными электронами *O. с.* определяется Хунда правилом. Энергия, к-рую *O. с.* необходимо сообщить атому в *O. с.* для отрыва электрона из внеш. оболочки, наз. энергией ионизации  $\epsilon_0$ ; аналогичная энергия для отрыва электрона из внутр. оболочки наз. энергией связи этой оболочки. *O. с.* для атома *H* обозначается  $1S_{1/2}$ , для *He* —  $1S_0$  и т.д. Взаимодействие атома в *O. с.* с др. частицами или фотонами может вызвать квантовый переход в стационарное состояние с большей внутр. энергией; такое состояние наз. возбуждённым.

**ОСНОВНЫЕ ЦВЕТА** — три цвета, оптич. сложением (смешением) к-рых в определ. кол-вах можно получить цвет, на глаз совершенно не отличный от любого данного цвета. Ограничивающим условием для *O. ц.* является их линейная независимость, т. е. ни один из них не может быть представлен в виде суммы к-л. кол-в двух других. Набор *O. ц.* образует трёхмерную координатич. систему. Число возможных систем *O. ц.* бесконечно. Подробнее см. *Колориметрия*.

**ОСОБАЯ ТОЧКА** аналитической функции — точка, в к-рой нарушаются условия аналитичности. Если аналитическая функция  $f(z)$  задана в нек-рой окрестности точки  $z_0$  всюду, кроме этой точки, и не имеет там другой *O. т.*, то  $z_0$  наз. а з о л и р о в а н н о й *O. т.* ф-ции  $f(z)$ . Если существует конечный предел  $f(z)$  при  $z \rightarrow z_0$ , то изолированная *O. т.* наз. у с т р а и м о й; если предел равен бесконечности или не существует, то  $z_0$  наз. н а к л о м о й и с у щ е с т в е н н о о с о б о й т о ч к о й. Устраняемая *O. т.* характеризуется тем, что разложение  $f(z)$  в Лорана ряд в окрестности  $z_0$  не содержит членов с отрицат. степенями ( $z - z_0$ ) [так что  $z_0$  фактически не является *O. т.* ф-ции  $f(z)$ ]. В случае полюса разложение  $f(z)$  в ряд Лорана содержит лишь конечное число таких членов, а в случае существенно особой точки — бесконечное. Если ф-ция  $f(z)$  допускает аналитическое продолжение вдоль любого контура, содержащегося в нек-рой окрестности точки  $z_0$ , но не проходящего через  $z_0$ , причём в результате однократного обхода точки  $z_0$  получаютс. др. значения  $f(z)$ , то  $z_0$  наз. ветвления т о ч к о й.

В аналитической теории дифференциальных уравнений *O. т.* ур-ния наз. точкой комплексной плоскости, к-рая является *O. т.* хотя бы для одного из коэф. ур-ния. Такие *O. т.* являются особыми и для решений (неоднородные *O. т.*). Имеются также под-вижные *O. т.*, положение к-рых определяется нач. условиями.

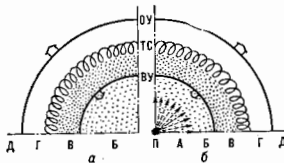
Лит. см. при ст. Аналитическая функция. Е. И. Звольков. **ОСТАТКИ ВСПЫШЕК СВЕРХНОВЫХ** — туманности, образующиеся при взаимодействии выброшенного во время вспышек сверхновых звезд вещества с окружающей средой. Вспышка сверхновой является результатом взрыва звезды на поздних стадиях эволюции с выделением энергии  $10^{50}$ — $10^{51}$  эрг. Взрыв может приводить либо к полному разлёту звезды, либо к выбросу только её внутр. слоёв с образованием звёздного остатка — вспышка сверхновой в виде нейтральной звезды или чёрной дыры. Свойства *O. в. с.* и его наблюдат. проявления определяются присутствием звёздного остатка и характером взаимодействия выброшенного газа с околозвёздным веществом.

В Галактике обнаружено ок. 140 *O. в. с.* Открыты *O. в. с.* и в близких галактиках: в Магеллановых Облаках выделено ок. 40 объектов, в галактиках M31 и M33 найдено более чем по 20 *O. в. с.* Почти все галактич. *O. в. с.* являются старыми объектами, возраст к-рых составляет десятки тысяч лет. Кроме старых *O. в. с.* существуют молодые объекты, обнаруженные на

месте «исторических» сверхновых, вспыхнувших в Галактике за последнее тысячелетие. Молодые О. в. с. сохранили неопределённые следы взрыва звезды и поэтому представляют большой интерес для физики сверхновых звезд. По наблюдаемым свойствам О. в. с. и кризисного блеска (зависимости блеска от времени) сверхновых, породивших их, молодые объекты можно разделить на три группы. К первой группе относятся О. в. с. 1066, О. в. с. Тихо Браге (1572) и О. в. с. Кеплера (1604). Они образовались при вспышках сверхновых I типа, звездные остатки в них не обнаружены. Крабовидная туманность (О. в. с. 1054) и 3C58 (О. в. с. 1181) оставлены вторю группу. Эти О. в. с. возникли в результате вспышек сверхновых II типа, к-рые сопровождаются образованием нейтронных звезд — пульсаров. Представителем третьей группы (называемой «богатые кислородом» О. в. с.) является радиосточник Кассиопея А. Вспышка сверхновой, давшей этот О. в. с., была на 5—6<sup>ти</sup> слабее обычных сверхновых I и II типов и поэтому не была зафиксирована астрономами; звездный остаток не обнаружен.

Взаимодействие выброшенного при вспышке сверхновой газа с окружающей средой описывается газодинамической структурой с двумя ударными волнами (рис. 1). Основная ударная волна бежит наружу в невозмущенной межзвёздной среде, если же вспышке предшествовала стадия истечения массы в форме *звёздного ветра*, то сначала в потерянном предсверхновой веществе. При прохождении через фронт ударной волны околозвёздный газ сжимается, нагревается и приобретает характерную для выброшенного вещества скорость. Возвратная ударная волна распространяется внутрь в выброшенном газе, и в ней этот газ сжимается, нагревается и тормозится. Излучение горячего газа как за фронтом осн. ударной волны, так и за фронтом возвратной ударной волны носит тепловой характер и приходится на рентг. диапазон. В области, ограниченной основной и возвратной ударными волнами, находится граница между нагретым веществом и выброшенным газом. Вблизи границы возникает неустойчивость Рэлея — Тейлора, к-рая приводит к образованию в этом месте турбулентного слоя. На фронте осн. ударной волны и в турбулентном слое происходит ускорение реля-

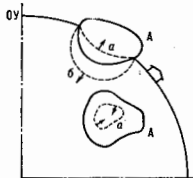
тивистских электронов и усиление магн. поля. Эти области представляют собой источники нетеплового синхротронного радиозлучения, имеющие оболочечную структуру. При наличии пульсара внутр. слою выброшенного вещества приспосабливается релятивистскими электронами, инжектируемыми пульсаром. В выброшенный газ, сжатый и нагретый возвратной ударной волной; Г — околозвёздный газ, сжатый и нагретый основной ударной волной; Д — невозмущенная околозвёздная среда. Широкие стрелки указывают направления распространения ударных волн относительно вещества.



тивистских электронов и усиление магн. поля. Эти области представляют собой источники нетеплового синхротронного радиозлучения, имеющие оболочечную структуру. При наличии пульсара внутр. слою выброшенного вещества приспосабливается релятивистскими электронами, инжектируемыми пульсаром, и вследствие этого являются мощным источником синхротронного излучения не только на радиочастотах, но и в оптич. и рентг. диапазонах. Выброшенный газ и околозвёздное вещество могут иметь неоднородную ключковую структуру, к-рая приводит в виде конденсаций и молюков. По мере расширения О. в. с. и увеличения его размеров

осн. ударная волна обжимает находящиеся в межзвёздной среде плотные облака (рис. 2), к-рые в свою очередь образуют крупномасштабную волокнистую структуру О. в. с.

Рис. 2. Схема распространения ударных волн в среде с неоднородностями плотности — плотными конденсатами в околозвёздном газе или плотными облаками в межзвёздной среде: А — неоднородности плотности; ОУ — основная ударная волна, бегущая по невозмущенной среде; ВУ — возвратная ударная волна, распространяющаяся внутрь неоднородности плотности; С — отражённая ударная волна.



Эволюция О. в. с. — процесс торможения выброшенного газа при расширении в окружающей среде — определяется гл. обр. энергией взрыва  $E_0$ , массой выброшенного газа  $M_0$  и плотностью околозвёздной среды  $\rho_0$ . В эволюции О. в. с. можно выделить три стадии: стадия свободного разлёта, адиабатическая и радиативная стадии. На этих стадиях (за исключением самого начала стадии свободного разлёта и, возможно, заключит. фазы радиативной стадии) О. в. с. имеют описанную выше структуру. На первой стадии из-за низкой плотности окружающей среды расширение выброшенного газа происходит в режиме свободного разлёта, когда радиус  $R_0$ , скорость  $v_0$  фронта осн. ударной волны и возраст О. в. с. связаны соотношением  $R_0 = v_0 t$ . В течение этой стадии почти вся энергия взрыва сосредоточена в кинетич. энергии выброшенного газа. По мере расширения торможение усиливается и, когда масса нагретого вещества  $(4\pi/3)R_0^3 \rho_0$  становится сравнимой с  $M_0$ , происходит переход к адиабатич. стадии. Для характерных значений  $E_0 = 3 \cdot 10^{51}$  эрг,  $M_0 = 1 M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  — масса Солнца) и  $\rho_0 = 10^{-24}$  г/см<sup>3</sup> этой момент соответствует  $R_0 = 2,3$  пк и  $t = R_0^3 / (2E_0/M_0)^{1/2} \approx 460$  лет. На адиабатич. стадии потери энергии на излучение малы по сравнению с энергией взрыва, поэтому энергия газа, находящегося за фронтом осн. ударной волны, остаётся прибл. постоянной, причём примерно 70% энергии взрыва преобразуется в тепловую энергию нагретого вещества. Адиабатич. расширение О. в. с. описывается соотношениями

$$R_0 = 1,15(E_0/\rho_0)^{1/2} t^{2/5} \text{ [см]},$$

$$v_0 = 2/5 R_0/t \text{ [см/с]},$$

$$T_0 = 1,36 \cdot 10^{-8} v_0^2 \text{ [K]},$$

где  $T_0$  — темп-ра газа за фронтом осн. ударной волны. С увеличением радиуса  $R_0$  темп-ра  $T_0$  уменьшается и, когда она достигает значения  $\approx 6 \cdot 10^4$  К, соответствующего максимуму кривой радиан. потерь, адиабатич. стадия заканчивается и начинается радиативная. К данному моменту излучается ок. 50% тепловой энергии О. в. с., радиус достигает  $\approx 20$  пк, возраст  $\approx 37000$  лет. Интенсивные радиац. потери делают осн. ударную волну изотермической, за её фронтом образуется тонкая, плотная и холодная оболочка, содержащая примерно 50% нагретого вещества. Заключённый внутри оболочки горячий газ в силу своей очень низкой плотности почти не излучает и расширяется адиабатически. Такое поведение О. в. с. на радиативной стадии описывается выражениями

$$R_0 = 0,042(E_0/\rho_0)^{1/2} t^{2/5} \text{ [см]},$$

$$v_0 = 2/5 R_0/t \text{ [см/с]}.$$

Расширение О. в. с. продолжается до тех пор, пока давление газа в нём не сравняется с давлением невозмущенной межзвёздной среды. Это происходит при  $R_0 \approx 477$

ширения О. в. с. оказывается сопоставимой со скоростью хаотич. движений окружающего газа: О. в. с. становится кинематически неотличимым от межзвёздной среды.

**Типичные представители.** Представителем О. в. с. I типа является О. в. с. Тихо Браге. Его радиоизображение характеризуется ярко выраженной оболочечной структурой (рис. 3). Спектр синхротропного радиоиз-

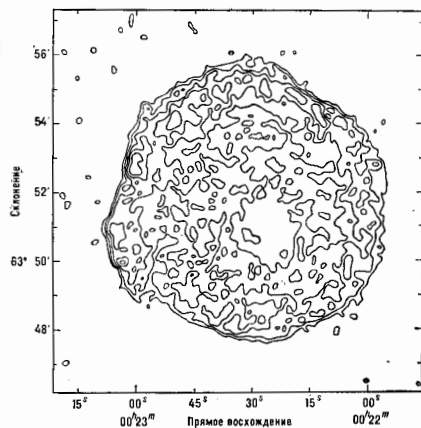


Рис. 3. Радиофото остатка вспышки сверхновой Тихо Браге на частоте 2700 МГц. Внешний контур изображения близок к фронту основной ударной волны, интервал между изоконтрами соответствует разности яркостных температур 11,6 К.

лучения О. в. с. степенной, спектральный индекс  $\alpha = -0,53$ . Степень линейной поляризации радиоизлучения ок. 5%. В оптич. диапазоне наблюдаются только балмеровские линии водорода  $H_\alpha$  и  $H_\beta$ , к-рые излучают тонкими волокнами вблизи внеш. границ протяжённого нетеплового радиоисточника. Рентг. излучение О. в. с. Тихо Браге имеет тепловую природу и исходит от двух пространственно разделённых горячих областей с темп-рой газа соответственно  $\approx 8 \cdot 10^6$  К и  $\approx 8 \cdot 10^7$  К. Первая область — это выброшенный газ, сжатый и нагретый вращательной ударной волной, а вторая — нагретый окоезвёздный газ, нагретый осн. ударной волной. Область с более низкой темп-рой, имеющая повышен. содержание тяжёлых элементов, даёт яркие эмиссионные рентг. линии, в частности линии Si и S, а излучение высокотемпературной плазмы образует непрерывный рентг. спектр. Масса выброшенного газа в О. в. с. Тихо Браге составляет 1—2  $M_\odot$ , и он находится в фазе перехода из стадии свободного разлёта в адiabатич. стадию.

**Крабоианная туманность, 3C58 и подобные им О. в. с.** II типа наз. в п л е р и о н а м и. Плерион характеризуется увеличением яркости радиоизлучения к центру О. в. с., пологим спектром с  $\alpha = -0,3$ , регулярной структурой маг. поля и высокой степенью линейной поляризации ( $\sim 20$ —30%). Эти свойства и нетепловое синхротропное излучение в диапазоне от радио до рентг. частот обусловлены находящимся в плерионе пульсаром. Помимо собственно плерионов, обнаружены комбиниров. О. в. с., к-рые содержат плерион внутри оболочечной структуры.

Радиоисточник Кассиопея А, относящийся к «богатым кислородом» О. в. с., имеет оболочечную структуру.

Связанная с ним оптич. туманность состоит из т. н. быстрых волокон (скорость расширения  $\approx 6000$  км/с) в стационарных конденсациях ( $\approx 100$ —400 км/с). По собств. движениям волокон и угл. размерам О. в. с. установлено, что вспышка сверхновой произошла в 1658 $\pm 3$ . Хим. состав быстрых волокон сильно отличается от солнечного: почти полностью отсутствует водород; обилие кислорода; аргона и серы в десятки раз больше нормального. Высокие скорости и хим. состав быстрых волокон указывают на то, что они состоят из выброшенного при вспышке газа. Стационарные конденсации имеют хим. состав, близкий к солнечному, и, по-видимому, представляют собой сгустки околосвёздного вещества, обжатые и ускоренные осн. ударной волной. Рентг. излучение Кассиопея А, подобно О. в. с. Тихо Браге, имеет тепловую природу и характеризуется двумя темп-рами. Масса выброшенного газа ок. 10  $M_\odot$ . Кассиопея А находится на стадии свободного разлёта.

Из старых галактик О. в. с. наиб. детально изучена Петля Лебеда. Эта тонковолокнистая туманность имеет линейный размер  $\approx 40$  пк, возраст  $\approx 2 \cdot 10^4$  лет и находится на адiabатич. стадии расширения. Масса нагретого межзвёздного вещества  $\approx 200 M_\odot$ . Оптич. излучение ярких волокон сосредоточено в линиях H, O, N, S и образуется за фронтом ударной волны, распространяющейся в плотных облаках межзвёздной среды, где концентрация газа (1—3)  $\cdot 10^3$  см $^{-3}$ , темп-ра достигает (1—6)  $\cdot 10^4$  К. Оптич. волокна наблюдаются на фоне менее яркого диффузного свечения. Рентг. излучение носит тепловой характер и возникает в горячей плазме с темп-рой (2—4)  $\cdot 10^6$  К за фронтом осн. ударной волны, бегущей со скоростью  $\approx 400$  км/с по межоблачной среде с концентрацией 0,2—4 см $^{-3}$ . В радиодиапазоне изображение Петли Лебеда имеет оболочечную структуру. Нетепловое радиоизлучение О. в. с. представляет собой синхротропное излучение релятивистских электронов в межзвёздном магн. поле, усиленном за фронтом осн. ударной волны.

Гигантские размеры О. в. с. и их число в Галактике показывают, что они занимают значит. долю объёма галактич. диска и, следовательно, играют важную роль в динамике межзвёздной среды, в обогащении её тяжёлыми элементами, в образовании огромных областей горячего разреженного газа. Порождаемые вспышками сверхновых ударные волны могут генерировать космич. лучи, а при взаимодействии с плотными газопыльными облаками способны инициировать процесс звездообразования.

Лит.: Шк л о в с к и й И. С., Сверхновые звезды и связанные с ними проблемы, 2 изд., М., 1976; Chevalier R. A., The interaction of supernovae with the interstellar medium, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, 1977, т. 15, в. 175; С п и н ц е р Л. мл., Физические процессы в межзвёздной среде, пер. с англ., М., 1981; Р а у н о л д Ж. С., Observations of supernova remnants, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, 1984, в. 22, р. 75; Л о в а н с к и й Т. А., Сверхновые звезды и звездный ветер. Взаимодействие с газом Галактики, М., 1986.

В. П. Утробин.

**ОСТОЙЧИВОСТЬ** — способность плавающего тела (суда), выведенного из положения равновесия, возвращаться вновь к исходному положению после прекращения действия возмущающих сил. О. судов зависит от взаимного расположения по высоте корпуса судна, его центра тяжести и метацентра. Устойчивость равновесия рассматривается лишь по отношению к таким перемещениям тела, при к-рых сохраняется объём тела, погружённый в жидкость, т. е. когда под действием возмущающих сил происходит поворот тела вокруг горизонтальной оси, лежащей в плоскости плавания. Плоскостью плавания наз. всякая плоскость, отсекающая от тела упомянутый пост. объём. По отношению к любому вертикальному поступат. перемещению равновесие всегда является устойчивым, а к любому горизонтальному поступат. перемещению и к любому повороту вокруг вертикальной оси равновесие тела, плавающего в однородной жидкости, очевидно, будет безразличным.

Если плавающее тело (судно) имеет вертикальную плоскость симметрии и центр тяжести тела в положении равновесия лежит на одной вертикали с метacentром, то тело будет устойчивым во всех случаях, когда центр тяжести тела расположен ниже самого низшего метacentра, являющегося точкой пересечения выталкивающей (архимедовой) силы, приложенной к выведенному из положения равновесия тела, с плоскостью симметрии тела (см. рис. в ст. *Метациентр*). Мерой  $O$  является расстояние между метacentром и центром тяжести тела,  $k$ -рое наз. метacentрической  $O$  с высотой.

С. Л. Вишневецкий.

**ОСЦИЛЛОГРАФ** (от лат. *oscillo* — качаясь и греч. *γράφω* — пишу), измерит. прибор, предназначенный для визуального наблюдения и исследования формы сигналов.  $O$  позволяет достаточно точно и оперативно измерять осн. параметры сигналов: амплитуду, частоту, временные интервалы, фазовый сдвиг и т. д. Под сигналами понимают величины, отражающую тем или иным способом состояние физ. системы. Самыми распространенными являются электр. сигналы (ток или напряжение), изменяющиеся во времени,  $x(t)$ . В зависимости от способа получения графика ф-ции  $x(t)$   $O$  разделяют на светолучевые и электронно-лучевые.

В светолучевых  $O$  значение электр. сигнала  $x(t)$  в какой-то момент времени  $t$  преобразуется в пропорц. сигналу вертикальное отклонение светового луча, сфокусированного на отражающем экране или светочувствит. плёнке. Для получения графика ф-ции  $x(t)$  необходимо устройство развёртки луча во времени (вдоль горизонтали экрана или плёнки). В качестве преобразователя величины тока или напряжения в пропорц. отклонение светового луча в светолучевом  $O$  применяют магнитоэлектр. гальванометр, к рамке к-рого прикрепляют отражающее зеркальце. Для развёртки луча по горизонтали экрана можно использовать вращающийся барабан с плоскими зеркальными графиями. Скорость вращения этого барабана определяет коэф. развёртки в с/м. Т. о., светолучевой  $O$  должен включать в себя в качестве осн. блоков магнитоэлектр. гальванометр и оптич. систему, состоящую из осветителя, фокусирующих линз, зеркальца на рамке гальванометра, зеркального барабана развёртки, экрана и др. вспомогат. устройств. Высокая чувствительность гальванометров позволяет увидеть в светолучевых  $O$  без усилителей и исследовать колебат. процессы с частотой до 10 кГц. Магн. система может быть общей для неск. гальванометров, поэтому можно конструировать светолучевые  $O$ , имеющие неск. измерит. каналов (2—24).

В электронно-лучевых  $O$  изображение сигнала осуществляется с помощью сфокусированного электронного луча, к-рый вызывает свечение люминофора экрана электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

Структурная схема электронно-лучевой  $O$  (рис. 1) включает след. основные блоки: блок усилителя вертикального отклонения луча, на входе усилителя имеется многоступенчатый делитель напряжения (аттенюатор), задающий коэф. отклонения (отношение входного сигнала к вызванному им отклонению луча); блок развёртки и канал горизонтального отклонения луча, в состав этого блока входят схема синхронизации, генератор пилообразного напряжения развёртки, усилитель горизонтального отклонения; базовый блок, в состав к-рого входит ЭЛТ, схема управления лучом (яркость, фокус, сдвиг по вертикали и горизонтали, модуляция яркости луча), блок питания.

Исследуемый сигнал поступает на вход  $Y$  и подается (непосредственно или через конденсатор) на входной аттенюатор, с помощью к-рого выбирает коэф. отклонения, т.е. усиление сигнала, удобное для наблюдения на экране ЭЛТ. Конденсатор не пропускает к усилителю постоянной составляющей сигнала. Это необходимо, напр., в тех случаях, когда исследуется небольшая переменная составляющая сигнала на фоне большой

постоянной составляющей. После аттенюатора сигнал поступает на вход усилителя вертикального отклонения, с выхода к-рого усиленный сигнал подает на вертикальные отклоняющие пластины ЭЛТ.

Из усилителя вертикального отклонения исследуемый сигнал поступает также на вход схемы синхронизации для запуска развёртки, для этого можно использовать и внеш. сигнал, подаваемый на вход внеш. синхронизации.

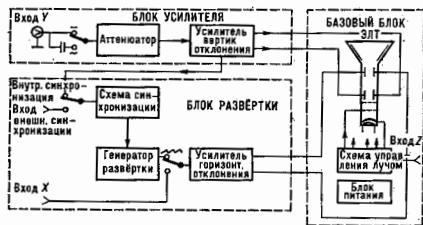


Рис. 1. Структурная схема осциллографа.

периоду. Схема синхронизации вырабатывает прямоуг. импульсы пост. амплитуды независимо от формы и величины входного сигнала. Благодаря этому достигается устойчивый запуск генератора развёртки, вырабатывающего пилообразное напряжение.

После усиления до необходимой величины усилителем горизонтального отклонения пилообразное напряжение поступает на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ. Крутизна (скорость изменения) пилообразного напряжения определяет скорость горизонтального перемещения луча и тем самым коэф. развёртки (отношение времени нарастания сигнала к отклонению луча за это время). Одно из осн. условий стабильного изображения сигнала на экране ЭЛТ состоит в том, чтобы временное положение  $k$ -ти точк. периода сигнала относительно начала развёртки оставалось неизменным в каждом цикле развёртки.

В  $O$  предусматривают возможность подачи внеш. напряжения на горизонтально отклоняющие пластины. При этом усилитель горизонтального отклонения отключают от генератора развёртки и подключают к входу  $X$ .

Генератор развёртки может работать в автоколебат. и ждущем режимах. В автоколебат. режиме трудно обеспечить одно из самых важных условий стабильного изображения сигнала на экране ЭЛТ (кратность периода развёртки произвольному периоду повторения сигнала). Этот режим поэтому малоупотребителен при измерениях. В ждущем режиме генератор развёртки в буквальном смысле ждёт внутри или внеш. сигналов запуска (синхронизации). Генератор развёртки в ждущем режиме запускают: при внутр. запуске — самим исследуемым сигналом или напряжением питающей сети; при внеш. запуске — сигналом, подаваемым на вход внеш. синхронизации (для этого в  $O$  имеется переключающее «синхронизация», к-рый устанавливают в соответствующее положение). При внеш. запуске параметры запускающего сигнала обычно остаются постоянными, поэтому движение луча всегда направлено начинается в опред. моменты времени, задающие начало отсчёта по оси времени для осциллограммы на экране. Установив ручки управления запуском развёртки, можно измерить фазовые и временные параметры сигнала в разл. точках исследуемой схемы. При внеш. запуске начало развёртки одинаково для всех наблюдаемых сигналов и задаётся сигналом внеш. запуска. При этом чаще всего для внеш. запуска развёртки используют сигнал, связанный во времени с выходным сигналом исследуемой схемы.

На рис. 2 изображена работа развертки в ждущем режиме с внеш. синхронизацией синхроимпульсами (рис. 2, а), связанными с наблюдаемым сигналом (рис. 2, б) жесткой временной связью. Синхроимпульсы задают начало импульса пилообразного напряжения (рис. 2, в) развертки О. По достижении (в момент  $t_1$ ) своего макс. значения напряжение развертки затем убывает до минимума (в момент  $t_2$ ). Отрезок ( $t_1 - t_2$ ) соответствует обратному ходу луча. Начиная с момента  $t_2$  генератор развертки едет ануса ближайшим синхроимпульсом в момент  $t_3$  и т. д. Исследуемые импульсы (рис. 2, в) задержаны на нек-рое время относи-

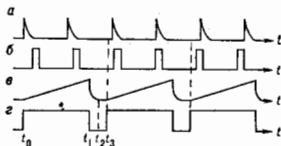


Рис. 2. Развертка в ждущем режиме с внешней синхронизацией.

тельно синхроимпульсов. Незменное положение наблюдаемых импульсов относительно импульсов пилообразного напряжения в каждом цикле развертки обеспечивает их стабильное изображение на экране ЭЛТ. Импульсы (рис. 2, в), вырабатываемые в О., используются для подвеса прямого хода луча в интервале ( $t_0, t_1$ ) и для гашения обратного хода луча в интервале ( $t_1, t_2$ ) в каждом цикле развертки. Желаемый масштаб изображения по горизонтали обеспечивается выбором коэф. развертки.

По своему назначению электронно-лучевые О. можно разделить на универсальные, импульсные, многоканальные, запоминающие, стробоскопические и т. д.

Универсальные О. предназначены для исследования однократных и периодич. электрич. сигналов и измерения их амплитудных и временных параметров. Универсальность обеспечивается наличием сменных блоков в каналах вертикального отклонения и развертки.

Для импульсного О. характерен широкий полосу частот усилителя вертикального отклонения, наличие быстрых разверток с малыми коэф. развертки. Эти условия необходимы для наблюдения кратковрем. импульсных процессов и измерения их параметров. В нек-рых импульсных О., кроме того, в канале вертикального отклонения имеется широкополосная линия задержки, необходимая для того, чтобы иметь возможность наблюдать передний фронт импульсного сигнала в режиме внутр. синхронизации ждущей развертки. В этом случае исследуемый сигнал сначала запускает генератор развертки, а затем, спустя время задержки, появляется на входе усилителя вертикального отклонения.

В многоканальных О. имеется неск. (2-4) каналов вертикального отклонения и задерживающей развертки, что обеспечивает одноврем. исследование синхронных и несинхронных сигналов в разл. амплитудных и временных масштабах, сравнение сигналов по форме при наличии временного сдвига между ними, полвет исследуемого участка развертки с одноврем. изображением его в измененном времени масштабе, алгебраич. сложение сигналов и т. д.

В запоминающих О. в качестве ЭЛТ используют запоминающие трубки (потенциалоском, графконы и др.), предназначенные для записи электрич. сигналов, хранения этой записи и считывания (воспроизведения) записанных сигналов в заданный момент времени. Вариантом запоминающих О. являются цифровые запоминающие О., принцип действия к-рых за-

ключается в преобразовании мгновенных значений исследуемых сигналов в цифровую форму с помощью быстродействующих аналого-цифровых преобразователей и запоминания их в цифровых запоминающих устройствах. Форма записанных сигналов и результаты измерения их параметров отображаются на экране ЭЛТ. Примером может служить цифровой запоминающий О. С9-8 (СССР), в к-ром управление осн. режимами работы осуществляется 12-разрядным микрпроцессором.

Стробоскопические О. предназначены для исследования повторяющихся сигналов малой длительности и характеризуются наличием стробоско-

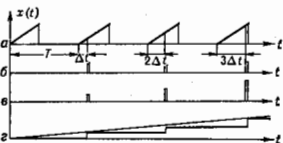


Рис. 3. Стробоскопический метод наблюдения коротких импульсов.

пич. блоков в усилителе вертикального отклонения и развертке. Принцип действия стробоскопич. системы основан на том, что при поступлении повторяющихся исследуемых сигналов (рис. 3, а) на вход усилителя вертикального отклонения при каждом запуске развертки на экране ЭЛТ изображается не весь сигнал, а только короткая его часть, наз. «вырезкой» сигнала. «Вырезка» мгновенных значений сигнала производится с помощью коротких стробирующих импульсов (рис. 3, б). Каждая «вырезка» сдвинута на величину шага считывания  $\Delta t$  относительно предыдущей «вырезки». Автоматический сдвиг стробоскопических импульсов на величину  $\Delta t$  в каждом цикле повторения сигнала обеспечивает стробоскопический блок развертки. На выходе стробирующего устройства получают модулируем. последовательность стробирующих импульсов (рис. 3, в), к-рые затем усиливают, расширяют и подают на схему, запоминающую амплитуду очередного импульса до прихода следующего. Т. о., получается ступенчатая ф-ция, огибающая к-рой воспроизводит форму сигнала (рис. 3, г). Длительность преобразованного сигнала во столько раз больше длительности исследуемого сигнала, во сколько раз его период  $T$  больше шага считывания  $\Delta t$ .

Лит.: Соловов В. Я., Осциллографические измерения, 2 изд., М., 1975; Справочник по радиоизмерительным приборам, т. 1-3, М., 1976-79. Ю. А. Романюк.

**ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ТРУБКА** — вид электронно-лучевых приборов из группы приёмных электронно-лучевых трубок, предназначенной для регистрации в графич. форме хода быстропротекающих процессов, данные о к-рых могут быть представлены в виде

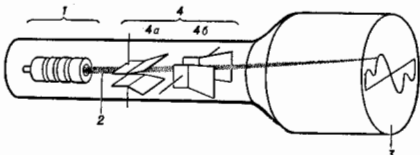


Рис. 4.

электрич. сигналов. Осн. элементами О. т. являются помещённые в вакуумно-плотную оболочку электронный прожектор 1 (рис. 4), формирующий узкий пучок электронов 2, светящийся под воздействием электро-

ного пучка люминесцентный экран  $\mathcal{E}$  и эл.-стат. система  $\mathcal{A}$ , отклоняющая пучок в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Отклоняющая система образуется двумя ортогонально расположенными парами пластин  $4a$  и  $4b$ , каждая из к-рых при подаче на них напряжения создаёт электр. поле, поперечное к оси  $O$ . т. Под действием периодич. поперечного напряжения, подаваемого на пластины  $4a$ , пучок перемещается с пост. скоростью в горизонтальном направлении, прочёркивая на экране ось времени. Измеряемый сигнал, подаваемый на пластины  $4b$ , вызывает вертикальное смещение пучка, пропорц. мгновенной величине сигнала. Сложение перемещений пучка по обеим осям приводит к вычерчиванию на экране светящегося графика (осциллограммы) процесса.

Осн. характеристиками  $O$ . т. являются: полоса регистрируемых частот (от нулевой до верхней границы), в пределах к-рой сигналы отображаются без искажений; чувствительность отклонения каждой пары пластин, определяемая смещением пучка на  $1$  В приложенного напряжения; скорость записи, определяемая как предельная скорость перемещения пучка по экрану, при к-рой яркость свечения ещё достаточна для визуального наблюдения периодич. сигналов или фотопр. регистрации быстротекущих однократных процессов. Отклоняющая система воспроизводит сигналы без искажений, если за время пролёта электронном сигнальных пластин фаза сигнала заметно не меняется. Система рис. 1 способна регистрировать сигналы в полосе частот до  $100-300$  МГц. При более высоких частотах воспроизведение сигнала происходит с сильным искажением. Для регистрации сигналов диапазона отклонение по оси сигналов чаще всего осуществляется спиральной отклоняюще-замедляющей системой (рис. 2). Измеряемый сигнал бежит по спирали со скоростью света, а его фазовая скорость в направлении оси  $O$ . т. оказывается замедленной в число раз, равное отношению длины витка спирали к её шагу. Если скорость движения электронов вдоль оси  $O$ . т. в зазоре между спиралью и пластиной равна той же фазовой скорости, то в любой траектории на электрон воздействует отклоняющее поле, находящееся в той же фазе, в к-рой оно было, когда электрон входил в систему. Такие системы способны реагировать на сигналы в полосе частот от  $0$  до  $5-10$  ГГц.

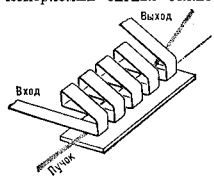


Рис. 2.

При заданной геометрии отклоняющей системы её чувствительность тем выше, чем меньше скорость электронов, а яркость свечения экрана тем выше, чем эта скорость больше. Поэтому во многих  $O$ . т. электроны пучка дополнительно ускоряются после отклонения. При очень высоких скоростях перемещения пучка по экрану в его возбуждении участвует лишь малое число электронов и яркость свечения оказывается недостаточной. В этих случаях перед экраном внутри  $O$ . т. помещается усилитель тока пучка в виде стеклянной пластины с большим числом сквозных микроканалов, в к-рых за счёт вторичной электронной эмиссии кол-во электронов умножается в тысячи раз. Для регистрации медленных и одиночных процессов используются также запоминающие  $O$ . т., длит. время сохраняющие на экране изображённое однократно записанное осциллограммы (см. Запоминающая трубка).

Лит.: Миллер В. А., Куракин Л. А., Приемные электронно-лучевые трубки, 2 изд., М., 1971; Котова-Щерба Г. С., Коваленко В. М., Запоминающие трубки с видимым изображением, М., 1970; Шерстнев Л. Г., Электронная оптика и электронно-лучевые приборы, М., 1971; Шкумов В. А., Семенов Г. И., Широмоловские осциллографические трубки и их применение, М., 1978. В. Л. Герус.

**ОСЦИЛЛЯТОР** (от лат. oscillo — качаюсь) — система (для материальной точки), совершающая колебательные периодич. движения около положения устойчивого равновесия. Термин « $O$ .» применим к любой системе, если описывающие её величины периодически меняются со временем. Простейшие примеры осциллятора в классической механике — грузик на пружинке, маятник.

Важнейший тип  $O$ . — линейный гармонический осциллятор, колебания к-рого являются осн. моделью движения частиц в атомах, молекулах ядрах, молекулах, твёрдых телах. Потенц. энергия линейного гармонич.  $O$ .  $U = kx^2/2$ , где  $x(t)$  — отклонение от положения равновесия,  $k$  — пост. коэф. (в случае груза на пружинке  $k$  — жёсткость пружины). Она представляет собой первый член разложения в ряд по  $x$  потенц. энергии  $U(x)$  при малых  $x$ .

Ур-ние движения линейного гармонич.  $O$ . имеет вид

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0, \quad (1)$$

где  $\omega = \sqrt{k/m}$  — частота  $O$ .,  $m$  — масса ( $\omega = 2\pi/T$ , где  $T$  — период колебаний; точки означают дифференцирование по времени). Общее решение ур-ния (1):

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re}\{A e^{i(\omega t + \varphi)}\} \quad (2)$$

( $A$  — амплитуда колебаний  $O$ .,  $\varphi$  — нач. фаза). Движение  $O$ ., описываемое зависимостью (2), происходит под влиянием возвращающей силы  $F$ , направленной к положению равновесия и пропорц. величине отклонения от положения равновесия:  $F = -\partial U/\partial x = -kx$ . При движении  $O$ . в пренебрежении силами трения его полная энергия

$$\mathcal{E} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} \quad (3)$$

сохраняется. Кинетич. энергия  $mv^2/2$  и потенц. энергия  $kx^2/2$  в процессе движения изменяются от нуля до  $\mathcal{E}$ . Энергия колебаний  $O$ . может быть выражена через амплитуду и частоту:

$$\mathcal{E} = m\omega^2 A^2/2. \quad (4)$$

Импульс  $O$ .  $p = mv$  меняется по тому же закону (2), что и  $x$ , но со сдвигом по фазе на  $\pi/2$ :

$$p(t) = m\omega A \sin(\omega t + \varphi + \pi/2) \quad (5)$$

(соответственно кинетич. и потенц. энергии  $O$ . изменяются в противофазе). Если изобразить движение  $O$ . на фазовой плоскости, по оси абсцисс к-рой отложена координата, а по оси ординат — импульс, то его периодич. движение происходит по эллипсу

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{p^2}{(m\omega A)^2} = 1 \quad (6)$$

с полуосями соответственно  $A$  и  $m\omega A$ .

Понятие « $O$ .» распространяется и на немеханич. системы: колебания тока и напряжения в колебат. контуре, колебания электронов напряжённостей электрич. и магн. полей в эл.-магн. волне и т. д.

В квантовой  $O$ . описывается гамильтонианом

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{m\omega^2 \hat{x}^2}{2}, \quad (7)$$

где  $\hat{p}$  и  $\hat{x}$  — операторы импульса и координаты; в конфигурац. представлении  $\hat{p} = -i\hbar\partial/\partial x$ ,  $\hat{x} = x$ . Уровни энергии квантового  $O$ . эквидистантны:

$$\mathcal{E}_n = \hbar\omega(n + 1/2), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Они определяются из Шрёдингера уравнения

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi_n(x,t)}{\partial x^2} + \frac{m\omega^2 x^2 \psi_n(x,t)}{2} = i\hbar \frac{\partial \psi_n}{\partial t} \quad (9)$$

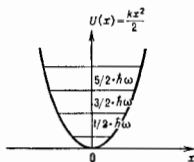
и изображаются обычно на кривой потенц. энергии  $O$ . **481**

(рис.), а волновые ф-ции  $\psi_n(x, t)$  стационарных состояний  $O$ . выражаются через полиномы Эрмита  $H_n$  (см. *Ортогональные полиномы*):

$$\psi_n(x, t) = (l\sqrt{\pi/2})^{-1/2} \exp(-x^2/2l^2) H_n(x/l) \exp(-iE_n t/\hbar). \quad (10)$$

Здесь  $l$  — амплитуда нулевых колебаний,  $l = \sqrt{\hbar/m\omega}$ . В осн. состоянии  $O$  с волновой ф-цией

$$\psi_0(x) = (l\sqrt{\pi})^{-1/2} \exp(-x^2/2l^2) \exp(-i\omega t/2) \quad (11)$$



живие проявляется в нормированных когерентных состояниях  $O$ .  $\psi_\alpha(x, t)$ :

$$\psi_\alpha(x, t) = (m\omega/\hbar\pi)^{1/4} \exp\left\{-\frac{|\alpha|^2}{2} - \frac{i\omega t}{2} - \frac{x^2}{2l^2} m\omega + \right. \\ \left. + \exp(-i\omega t)\alpha x(2m\omega/\hbar)^{1/2} - \frac{1}{2}\alpha^2 \exp(-2i\omega t)\right\}, \quad (12)$$

удовлетворяющих нестационарному уравнению Шрёдингера и являющихся собств. состояниями для неэрмитового интеграла движения (оператора уничтожения)

$$\hat{A}(t) = \frac{\exp(i\omega t)}{\sqrt{2}} \left( \frac{\hat{x}}{l} + i\frac{\hat{p}}{\hbar} \right), \quad [\hat{A}, \hat{A}^\dagger] = 1, \quad (13)$$

с комплексным собств. значением  $\alpha$ :  $\hat{A}\psi_\alpha = \alpha\psi_\alpha$ . В когерентном состоянии  $\psi_\alpha$  ср. значения координаты ( $\hat{x}$ ) и импульса ( $\hat{p}$ ), как и в классич. механике, описывают в фазовом пространстве эллипс. Оператор уничтожения  $\hat{A}$  и оператор рождения  $\hat{A}^\dagger$  действуют на  $n$ -е состояние след. образом:

$$\hat{A}\psi_n = \sqrt{n}\psi_{n-1}, \quad \hat{A}^\dagger\psi_n = \sqrt{n+1}\psi_{n+1}, \quad (14)$$

т. е. соответственно уничтожают и рождают квант энергии  $O$ . Через операторы рождения и уничтожения гамильтониан гармонич.  $O$  выражается так:

$$\hat{H} = \hbar\omega(\hat{A}^\dagger\hat{A} + 1/2). \quad (15)$$

Важность модели  $O$  заключается в том, что все совр. модели квантовой теории поля базируются на многомерном (бесконечном) обобщении этого выражения:

$$\hat{H} = \sum_f \hbar\omega_f(\hat{A}_f^\dagger\hat{A}_f + 1/2), \quad (16)$$

где индекс  $f$  трактуется как характеристика моды поля (эл.-магн., акустического и т. д., т. е. фотона, фонона и т. п.), а операторы  $\hat{A}_f^\dagger$ ,  $\hat{A}_f$  — как операторы рождения и уничтожения кванта бозонного поля. К этой же модели сводится движение заряда в магн. поле, изменение тона и напряжения в колебат. контуре, колебания ядер в многоатомных молекулах и атомов в молекуле в твёрдых телах, колебат. движение нуклонов в ядрах и т. д.

При учёте затухания ур-ние движения (1)  $O$  принимает вид

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega^2 x = 0, \quad (17)$$

где  $\gamma$  — коэф. затухания, а движение  $O$  представляет

собой затухающие колебания около положения равновесия:

$$x(t) = A \exp(-\gamma t) \cos(\omega t + \varphi). \quad (18)$$

В квантовой картине затухание колебаний  $O$  описывается неск. моделями, одна из к-рых базируется на гамильтониане

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m\exp(2\gamma t)} + \frac{m\omega^2 \hat{x}^2 \exp(2\gamma t)}{2}, \quad (19)$$

причём во всех моделях ср. значения координаты  $O$  описываются ф-лой (18), а для др. величин в рамках разных моделей имеются различия. Если на  $O$  действует внеш. периодическая (с частотой  $\Omega$ ) сила  $f \cos(\Omega t)$ , то возникают вынужденные колебания  $O$  на частоте вынуждающей силы, описываемые ф-лой

$$x(t) = \frac{f \cos(\Omega t + \varphi)}{m(\Omega^2 - \omega^2 + i\gamma\Omega)}, \quad \text{tg } \varphi = \frac{2\gamma\Omega}{\Omega^2 - \omega^2}. \quad (20)$$

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при сближении собств. частоты  $O$  и частоты вынуждающей силы наз. резонансом гармонич.  $O$ . Коэф. затухания определяет сдвиг фазы  $\varphi$  колебаний  $O$  по отношению к вынуждающей силе, равный  $0$  при отсутствии затухания и  $\pi/2$  и резонансе. Для квантового аналога  $O$  с затуханием также существует резонанс. Под влиянием внеш. силы  $f(t)$  квантовый  $O$  может переходить с одного уровня энергии ( $n$ ) на другие ( $m$ ). Вероятность этого перехода  $W_{nm}(t)$  для  $O$ . без затухания дается ф-лой

$$W_{nm}(t) = \frac{n!}{m!} |\delta|^{m-n} \exp(-|\delta|^2) \{L_n^{m-n}(|\delta|^2)\}^2, \quad (21)$$

где  $\delta(t) = -i\hbar^{-1} \int_0^t f(t') \exp(i\omega t') dt'$ ,

$L_n^{m-n}$  — полиномы Лагерра (см. *Ортогональные полиномы*). Правила отбора для  $O$  определяются ненулевыми матричными элементами оператора координаты (дипольное приближение). Согласно ф-лам (13), (14), эти элементы отличны от нуля только для переходов между соседними уровнями, поэтому излучение  $O$  происходит на одной частоте (совпадающей с классической,  $\omega = \sqrt{k/m}$ ).

Если потенц. энергия  $O$  содержит члены типа  $\alpha x^4$ ,  $\beta x^6$  и т. д., то  $O$  наз. а н гармоническим (нелинейным) и характер его движения радикально отличается от даваемого ф-лой (2). Если частота гармонич.  $O$  меняется со временем, то  $O$  наз. параметрическим, для к-рого также характер колебаний отличен от (2), причём существуют новые явления, напр. параметрич. резонанс  $E$ .

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Квантовая механика, 4 изд., М., 1989; и т. же, Механика, 4 изд., М., 1988, с. 207; Малкин И. А., Мана и о. В. И., Динамические симметрии и квантовые состояния квантовых систем, М., 1979.

В. И. Манько

**ОСЦИЛЛЯЦИИ** элементарных частиц — периодический во времени и пространстве процесс вращения частиц определ. совокупности друг в друга. В простейшем случае  $O$  двух частиц  $A$  и  $B$  (илд. что то же самое,  $O$  в системе частиц  $A$  и  $B$ ) — периодич. процесс полного или частичного перехода  $A$  в  $B$  и обратно:  $A \leftrightarrow B$ .

Первый и наиб. хорошо изученный пример —  $O$  в системе нейтральных  $K$ -мезонов:  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ . Теоретич. предсказание и обсуждение эксперим. следствий  $O$ .  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  были даны А. Пайсом (A. Pais) и О. Пиччио (O. Piccioni) в 1955 (э ф ф к т П а й с а — П и ч ч и о), обнаруженный и исследованный в 1957—61). В 1957 Б. М. Понтекорво высказал предположение о существовании др. пар нейтральных частиц, у к-рых не запрещены переходы частица — античастица и к-рые, следовательно, должны осциллировать. В этой связи предложены пока гипотетические  $O$ . мюоний — анти-

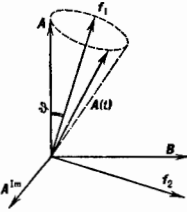
мюоний (связанные системы  $e^+ \mu^+$  и  $e^+ \bar{\mu}^-$ ) и нейтрино—антинейтрино. В обоих случаях необходимым является взаимодействие, нарушающее сохранение лептонного числа. В 1962 г. Маки (S. Maeki), М. Накагава (M. Nakagawa) и С. Саката (Sh. Sakata) теоретически рассмотрели случаи О. нейтрино разных типов:  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ . В 1985 в протон-антипротонных соударениях коллобарающей УА1 в ЦЕРНе были обнаружены события, свидетельствующие об О. нейтральных  $B_s$ -мезонов:  $B_s^0 \leftrightarrow \bar{B}_s^0$  (аналогов  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  для мезонов с  $b(\bar{b})$ - и  $s(\bar{s})$ -кварками). В 1987 в экспериментах на накопительном кольце  $e^+e^-$  в ДФЭИ (детектор АРГУС) наблюдались эффекты О. мезонов, состоящих из  $b$ - и  $d$ -кварков,  $B_d^0 \leftrightarrow \bar{B}_d^0$ . Должны существовать также О.  $D^0 \leftrightarrow \bar{D}^0$ , но ожидаемые эффекты очень малы (далеко за пределами чувствительности существующих экспериментов). Ведутся поиски О. нейтрон—антинейтрон, предсказываемых в теориях с нарушением сохранения барионного числа. Обсуждаются экзотич. каналы, такие, как фотон — аксион и др.

Осцилляции и смешивания частиц. О.  $A \leftrightarrow B$  есть следствие смешивания частиц  $A$  и  $B$ . В вакууме это смешивание выражается в том, что состояния  $|A\rangle$  и  $|B\rangle$  являются когерентными комбинациями двух состояний  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  с определенными, но различными массами  $m_1$  и  $m_2$  (сами  $A$  и  $B$  определенных масс не имеют):

$$\begin{aligned} |A\rangle &= \cos\theta |f_1\rangle + \sin\theta |f_2\rangle, \\ |B\rangle &= \cos\theta |f_1\rangle - \sin\theta |f_2\rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

Коэф. (1) выражены из условия ортонормированности, угол  $\theta$  наз. углом смешивания в вакууме (рис. 1). Согласно (1), смешивающиеся  $A$  и  $B$  состоят

рис. 1. Графическое представление смешивания и осцилляций. Состояниям с определенными массами и взаимодействиями сопоставляются два ортогональных базиса в действительных плоскостях  $(f_1, f_2)$  и  $(A, B)$ . Смешивание выражается в повороте базиса друг относительно друга на угол  $\theta$ . Эволюция состояния  $|A(t)\rangle$  описывается вращением единичного вектора  $A(t)$  по поверхности конуса с углом раствора  $\theta$ . Период вращения  $T = T_{\text{осц}}$ . Проекция  $A(t)$  на плоскость  $(A, B)$  равна амплитуде вероятности обнаружить частицу  $A$  в момент  $t$   $[A^m]$  соответствует минимальной части состояния  $|A(t)\rangle$ .



из одних и тех же компонент  $f_1$  и  $f_2$ , но различаются величинами их примесей, а также разностью фаз  $\Delta\phi$  между их состояниями. В  $|A\rangle$  составляющие  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  находится в фазе  $\Delta\phi = 0$ , в  $|B\rangle$  — в противофазе  $\Delta\phi = \pi$ . Максимальное смешивание имеет случ. случай, когда  $\theta = 45^\circ$ ; при этом  $|A\rangle \parallel |B\rangle$  различаются только разностью фаз, примеси состояний  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  в них равны.

О. возникают в процессе эволюции сложного состояния, рожденного как состояние  $|A\rangle$  или  $|B\rangle$ , т. е. необходимым условием возникновения О. является рождение частиц  $A$  или  $B$  — «приготовление» одной из когерентных комбинаций (1). Частицы  $A$  и  $B$  рождаются и поглощаются в определ. взаимодействиях. Они характеризуются определ. различающимися квантовыми числами (ароматами  $F_A, F_B$ ), к-рые в этих взаимодействиях сохраняются. Поэтому в данной конкретной реакции рождается либо частица  $A$ , либо частица  $B$ . В этой связи состояния  $|A\rangle$  и  $|B\rangle$  наз. с собственными состояниями и взаимодействиями или состояниями с определ. ароматами. Напр., в случае  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  — это сильное взаимодействие, сохраняющее странность:  $F = S$ , причём  $S(K^0) = +1, S(\bar{K}^0) = -1$ . В случае  $O, \nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  нейтрино  $\nu_e$  или  $\nu_\mu$  рождаются в слабом взаимодействии, обуслов-

ленным заряженными токами, а ароматами являются электронное ( $L_e$ ) или мюонное ( $L_\mu$ ) лептонные числа:  $L_e(\nu_e) = 1, L_e(\bar{\nu}_e) = 0, L_e(\nu_\mu) = 0, L_e(\bar{\nu}_\mu) = 1$ .

Смешивание  $A$  и  $B$  (1) обусловлено дополнит. взаимодействием типа  $v \cdot \hat{A} \cdot \hat{B} + \text{с. с.}$ , переводящим  $A$  в  $B$  и наоборот (здесь  $v$  — параметр размерности массы в случае фермионов и квадрата массы в случае бозонов;  $\hat{A}, \hat{B}$  — операторы полей соответствующих частиц; э. с. — эрмитово-сопряжённый член). Это взаимодействие имеет вид недиагонального массового члена в гамма-матрице, и массовая матрица частиц  $A$  и  $B$  оказывается недиагональной. Следовательно,  $A$  и  $B$  действительно не име-

ют определ. масс; таковыми обладают новые состояния  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  — комбинации  $|A\rangle$  и  $|B\rangle$ , к-рые диагонализуют массовую матрицу [эти комбинации можно получить, разрезав систему (1) относительно  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$ ]. В результате диагонализации фиксируются массы частиц  $f_1$  и  $f_2$ , а также угол смешивания:  $\text{tg}(2\theta) \sim v$ . Состояния  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  часто наз. собственными состояниями и состояниями с массовой матрицей  $m$ . Вакуумное смешивание означает, т. о., несовпадение собств. состояний взаимодействий и собств. состояний массовой матрицы.

Дополнит. взаимодействие, приводящее к смешиванию, явно нарушает аромат (квантовые числа) частиц  $A, B$  и, как следствие этого, в процессе О. аромат не сохраняется. Для  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$   $|\Delta S| = 2$ , для  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$   $|\Delta L_e| = 1, |\Delta L_\mu| = 1$  и т. д.

Основные параметры осцилляций. О. возникают в процессе эволюции в пространстве-времени смешивающихся состояний (1). Говорят об О. аромата (странности, красоты, чисел  $L_e, L_\mu$  и др.) в данном смешанном состоянии.

Распространение частицы, рожденной, напр., как  $A$ , описывается суперпозицией двух волновых пакетов, соответствующих состояниям  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$ . Именно  $|f_1\rangle$ , являясь собств. состоянием гамма-матрицы в вакууме, обладают определенными энергиями и фазовыми скоростями, они эволюционируют независимо, и доли их примесей сохраняются. Из-за различия в массах пакеты  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  имеют разные фазовые скорости:  $v_i = \dot{\phi}_i / p_i$ , где  $\dot{\phi}_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2}$ ,  $p_i$  и  $m_i$  — соответственно полная энергия, импульс и масса частицы  $f_i$  (принята система единиц, в к-рой  $c = 1$ ). Поэтому в процессе распространения разность фаз между  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  будет изменяться. Если пакеты достаточно короткие, то разность фаз в любой точке пакетов примерно одинавова и равна разности фаз соответствующих плоских волн:  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ , где  $\phi_i = \dot{\phi}_i t - p_i x$ . Состояние, рожденное как  $|A\rangle$ , в произвольный момент времени  $t$  имеет вид

$$|A(t)\rangle = \cos\theta |f_1\rangle + \sin\theta |f_2\rangle e^{i\phi(t)}. \quad (2)$$

Разности фазовых скоростей и фаз можно оценить, полагая, напр., что импульсы частиц  $f_1$  и  $f_2$  одинаковы:

$$\begin{aligned} \Delta\phi(t) &= \Delta\dot{\phi} t = (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) t = \\ &= \begin{cases} \Delta m \cdot t & \text{при } p \ll m, \\ \frac{\Delta m^2}{2p} t & \text{при } p \gg m, \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta m = m_1 - m_2$ ,  $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$ . Монотонный рост со временем разности фаз  $\Delta\phi$  и приводит к О. Действительно, в нач. момент  $|A(0)\rangle = |A\rangle$ , но при  $t \neq 0$   $|A(t)\rangle \neq |A\rangle$  и  $\langle B | A(t)\rangle \neq 0$ , т. е. в  $|A(t)\rangle$  появляется примесь  $|B\rangle$ . Это процесс периодический: к моменту  $t = T_{\text{осц}}$  определяемому условием  $\Delta\phi(T_{\text{осц}}) = 2\pi$ , система (осциллирующие частицы) окажется в исходном состоянии  $|A\rangle$ . Согласно (3), период О. равен

$$T_{\text{осц}} = \begin{cases} \frac{2\pi}{\Delta m} & \text{при } p \ll m, \\ \frac{4\pi p}{\Delta m^2} & \text{при } p \gg m. \end{cases} \quad (4)$$



Расстояние, на к-ром система возвращается к исходному состоянию, наз. длиной осцилляций  $l_{осц}$ . В обоих случаях (нерелятивистском и релятивистском)

$$l_{осц} = v T_{осц} = \frac{4\pi r}{\Delta m^2}, \quad (5)$$

где  $v$  — групповая скорость пакетов.

Макс. отличие состояния  $|A\rangle$  от исходного наблюдается в моменты времени  $t_n$ , когда  $\Delta\Phi(t_n) = \pi + 2\pi n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), при этом вероятность обнаружить частицу  $B$  определяет г л у б и в о с ц и л л я ц и й:

$$a = |\langle B | A(t_n) \rangle|^2 = \sin^2(2\theta). \quad (6)$$

Вероятность обнаружить частицу  $A$  в произвольный момент  $t$  равна:

$$P_{A \rightarrow A}(t) = \bar{P} + \frac{1}{2} a \cos \frac{2\pi t}{T_{осц}}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{P} &\equiv \frac{1}{2}(P^{макс} + P^{мин}) = \frac{1}{2}[1 + (1 - a)] = \\ &= 1 - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

ср. значение, или вероятность, усреднённая по периоду (рис. 2). Выражение (7) может быть переписано в наб. часто используемом виде

$$P_{A \rightarrow A}(t) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \frac{\pi x}{l_{осц}} = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \frac{\pi x}{l_{осц}} \quad (9)$$

( $x$  — расстояние от точки рождения частицы  $A$  до точки наблюдения). Вероятность перехода  $A \rightarrow B$  равна  $P_{A \rightarrow B} = 1 - P_{A \rightarrow A}$ .

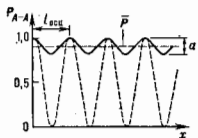


Рис. 2. Пространственная картина осцилляций. Зависимость от расстояния  $x$  вероятности обнаружить частицу исходного типа: сплошная линия — малое смешивание; пунктир — максимальное смешивание.

Глубина  $O$ .  $a$  и ср. вероятность  $\bar{P}$  определяются только углом  $\theta$ , причём в случае макс. смешивания глубина наибольшая:  $a = 1$ ,  $\bar{P} = 1/2$ .

$O$ . являются по существу интерференц. эффектом. Компоненты  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$ , составляющие  $|A\rangle$ , могут быть разложены в соответствии с (1) по состояниям  $|A\rangle$ ,  $|B\rangle$  с опред. ароматами. Т. о. возникают две волны  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  от  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$ , имеющие одинаковый аромат, но разные фазовые скорости. Эти волны интерферируют, и результат интерференции определяет амплитуду вероятности обнаружить частицу  $A$  в состоянии  $|A(t)\rangle$ . Из-за различия в фазовых скоростях волн характер интерференции изменяется от максимально конструктивной в моменты  $t = n \cdot T_{осц}$  до максимально деструктивной при  $t = (1/2 + n) \cdot T_{осц}$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  Аналогично описывается  $O$ .  $F_B$ -аромата.

Если область генерации частиц или размеры детектора превышают  $l_{осц}$  или если энергетич. разрешение установки невелико:  $\Delta E/E > l_{осц}/r$ , где  $r$  — расстояние от источника до детектора, то происходит усреднение  $O$ . и измерения дадут  $P = \bar{P}$ . Это усреднение имеет квантовомеханич. природу и соответствует потере когерентности между  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$ , к-рая может быть связана либо с большими размерами волновых пакетов, либо с тем, что разность фаз  $\Delta\Phi$  оказывается случайной величины. (В первом случае в разных точках пакетов  $\Delta\Phi$  принимает значения от 0 до  $\Delta\Phi_m \gg 2\pi$ .) Интерференция волн  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  при этом исчезает.

Обобщения. Аналоги осцилляций. Выделяют два типа осцилляций:  $O$ . частица — античастица ( $A \leftrightarrow \bar{A}$ ) с изменением аромата на двойку, т. е.  $|\Delta F| = 2$ ;  $O$ . частиц с разными ароматами, когда  $|\Delta F_A| = |\Delta F_B| =$

$= 1$ . Для  $A \leftrightarrow \bar{A}$  реализуется случай макс. смешивания. Это связано с тем, что в силу теоремы  $CPT$  диагональные элементы массовой матрицы, т. е. амплитуды переходов  $A \rightarrow A$  и  $\bar{A} \rightarrow \bar{A}$ , одинаковы. К указанному типу относят  $O$ .  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ ,  $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ ,  $\nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$ , мюоний — антимюоний и др. Взаимодействие осциллирующей системы с веществом и внеш. полями устраняет равенство диагональных элементов, и смешивание становится не максимальным.

Для  $O$ . второго типа, по-видимому, типично малое смешивание, как это имеет место для кварков, а следовательно, и малая глубина  $O$ . Такая ситуация может реализоваться для нейтрино:  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ ,  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau$ .

$O$ . имеют ряд аналогов в др. областях физики, прежде всего в механике. По существу это бения в системе слабосвязанных осцилляторов, напр. маятников. Колебания одного маятника соответствуют распространению частицы  $A$ , колебания другого — распространению частицы  $B$ . Связь между осцилляторами эквивалентна взаимодействию, переводящему  $A$  в  $B$ . Периодич. передача колебаний от одного маятника другому и есть аналог  $O$ . Осцилляции аналогичны таким явлениям, как вращение плоскости поляризации света в оптических активных средах, прецессия спина частиц в магн. поле и др.

В случае смешивания трёх и более частиц (напр., трёх нейтрино  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) осцилляц. вероятности оказываются суперпозициями трёх и более периодич. ф-ций (9). С прктич. точки зрения важной характеристикой является наб. возможное подавление потока исходных частиц в результате усреднения  $O$ . Минимизация вероятности  $\bar{P}_{A \rightarrow A}$  по углам смешивания даёт для системы  $N$  частиц:

$$\bar{P}_{A \rightarrow A}^{мин} = \frac{1}{N}.$$

Если при смешивании  $CP$ -чётность сохраняется, то вероятности осцилляц. переходов для частиц и античастиц совпадают:  $\Delta P = P_{A \rightarrow B} - P_{\bar{A} \rightarrow \bar{B}} = 0$ . Нарушение  $CP$ -инвариантности связано с появлением комплексной фазы  $\epsilon^{ij}$  в матрице смешивания. При этом разность вероятностей  $\Delta P \sim \sin 2\theta$  отлична от нуля.

Осцилляционные эксперименты.  $O$ . непосредственно проявляются в том, что в нукле частиц, состоящем первоначально на частиц  $A$ , в процессе его распространения периодически появляются и исчезает примесь частиц  $B$ . Детекторы, расположенные на разных расстояниях от источника  $A$ , будут регистрировать разные примеси  $B$  и соответственно разное подавление исходного  $A$ -потока (рис. 2). При фиксиров. расстоянии источник — детектор и непрерывном энергетич. спектре частиц  $O$ . приводит к появлению квазипериодич. структуры на спектре частиц  $A$  вследствие зависимости длины  $O$ . от энергии [см. (5)].

Картина  $O$ . искажается, если одна или обе частицы  $f_1$  и  $f_2$  распадаются, как это имеет место, напр., для  $K^0, \bar{K}^0$ -мезонов. Распад в осциллирующем состоянии (2) описывается дополнит. факторами  $\exp(-\Gamma_i t/2)$  перед  $|f_i\rangle$ , где  $\Gamma_i$  — ширина распада частицы  $f_i$ . Это приводит к экспоненц. затуханию  $O$ .:  $\bar{P}$  и  $a$  уменьшаются.

Др. фактор, влияющий на  $O$ . — расхождение волновых пакетов  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  из-за различия их групповых скоростей. В процессе движения пакеты смещаются друг относительно друга и, т. к. они имеют конечные размеры, их перекрытие уменьшается, соответственно уменьшается глубина  $O$ . При полном расхождении пакетов  $O$ . исчезает.

Параметры  $O$ . — глубина, ср. вероятность и длина — зависят от  $\Delta m(\Delta m^2)$  и  $\theta$  [см. (3), (4), (6)]. Поэтому исследование осцилляц. эффектов является методом измерения разностей масс (кватратов масс) и углов смешивания. Отрицат. результат поиска  $O$ . в предельных случаях может означать, что либо малое смешивание и гл-

бина  $O$ . меньше чувствительности эксперим. установки, либо мала разность масс (квадратов масс), так что длина  $O$ . много больше расстояния источник — детектор и  $O$ . не успевает развиться. Эксперимент при этом даёт ограничения сверху на  $\Delta m (\Delta m^2)$  и  $\sin^2 2\theta$ . Поскольку  $O$ . являются эффектом нарушения определённых квантовых чисел, их поиск есть метод исследования взаимодействий, нарушающих эти числа.

**Осцилляции в веществе.** Среда изменяет эволюцию системы смешанных частиц. В случае  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  это эффект когерентной регенерации  $K_S^0$ -мезонов  $\nu$ , описанный Пайсом и Питчони (в той же работе, в  $K$ -рой были предсказаны  $O$ .  $K^0$ -мезонов) и затем детально исследованный в эксперименте. В 1977 Л. Вольфштейн (L. Wolfenstein) рассмотрел аналогичный эффект для нейтрино.

Влияние среды связано с упругим рассеянием на нулевой угол осциллирующих частиц  $A$  и  $B$  на компонентах среды. Такое рассеяние сводится к появлению  $\nu$  волн, описывающих движение  $A$  и  $B$ . показателем преломления, а следовательно, к изменению их фазовых скоростей. Среда модифицирует  $O$ . если рассеяние частиц  $A$  и  $B$  различно. В этом случае между волнами  $A$  и  $B$  появится разность фаз, а также будут осуществляться переходы между состояниями с определ. массами  $|f_1\rangle \leftrightarrow |f_2\rangle$ . Амплитуды этих переходов пропорц. разности амплитуд рассеяния частиц  $A$  и  $B$ . Это означает, что  $|f_1\rangle$  и  $|f_2\rangle$  в среде уже не являются собств. состояниями гамма-топона и сами осциллируют. Смешивание  $|A\rangle$  и  $|B\rangle$  в среде следует определять по отношению к собств. состояниям  $|f_i^0\rangle$  [аналогично тому, как это было сделано в (4)] гамма-топона для данной среды с учётом взаимодействий, поскольку именно  $|f_i^0\rangle$  обладают определёнными фазовыми и групповыми скоростями. Т. к. в среде  $f_i^0 \neq |f_i\rangle$ , то угол смешивания в веществе  $\theta_m$  будет отличен от  $\theta$ . В однородной среде  $|f_i^0\rangle$  эволюционируют независимо, переходов  $|f_i^0\rangle \leftrightarrow |f_j^0\rangle$  нет (т. е. доли их примесей не меняются). Поэтому качественная картина  $O$ . оказывается такой же, как в вакууме, но с изменёнными параметрами: в выражениях для  $a$  и  $\bar{P}$  вакуумный угол  $\theta$  следует заменить на  $\theta_m$ . В зависимости от знаков разности амплитуд и  $\Delta m$ , величин плотности вещества и энергии среда может как усиливать, так и ослаблять  $O$ .

Т. о., общим условием возникновения  $O$ . является рождение состояний, представляющих собой суперпозицию (когерентную смесь) двух или неск. невырожденных собств. состояний гамма-топона для данной среды  $|f_i^0\rangle$  (при этом наличие частиц с ненулевыми массами не обязательно).  $O$ . в данном состоянии  $|A\rangle$  происходит относительно  $|f_i^0\rangle$ . (В вакууме состояния  $|f_i^0\rangle$  совпадают с состояниями, имеющими определ. массы:  $|f_i^0\rangle = |f_i\rangle$ .) Глубина  $O$ . есть мера несовпадения  $|A\rangle$  с одним из собств. состояний гамма-топона; длина  $O$ . обратно пропорц. разности собств. значений  $|f_i^0\rangle$ .

В среде с изменяющейся на пути частиц плотностью возникают качественно новые эффекты: в процессе распространения частиц изменяются и глубина  $O$ . и их ср. значение (см. *Резонансная конверсия нейтрино*). Там: P. A. R. S. L. O. O., Note on the decay and absorption of the  $\nu$ , Phys. Rev., 1958, v. 100, p. 1487; Марков А. М., Гипероны и  $K$ -мезоны, М., 1958; Вилевицкий С. М., Понтекорво В. Е. М., Смешивание лептонов и осцилляции нейтрино, УФФ, 1977, т. 123, с. 181; Окумури Т. В., Итогути и кварки, 2 изд. М., 1980; Уралов В. Н. Г., Ховс В. А., Смешивание кварков в слабых взаимодействиях, УФФ, 1985, т. 146, с. 507. А. Ю. Смирнов.

**ОСЦИЛЛЯЦИИ ЗОНДАЙМЕРА** — периодич. зависимость кинетич. характеристик (коэф. электропро-

водности  $\sigma$ , теплопроводности  $\chi$ , термоэлектрич. коэф.) в тонких слоях проводника от магн. поля  $H$ . Предсказаны в 1950 Э. Зондаймером.  $O$ . З. связаны с фокусирующей ролью магн. поля. Пучок электронов с одинаковой энергией  $\epsilon$  в проекции импульса  $p$  на направление  $H$  ( $p_H$ ) «стартован» из одной точки поверхности в глубь образца и движется по спиральной траектории, собирается в точке на противоположной поверхности, если электроны пройдут толщину образца ( $d$ ) за одно число ( $N$ ) периодов обращения в магн. поле  $2\pi/\omega_c$  ( $\omega_c$  — циклотронная частота), т. е. имеет место соотношение

$$d = N \frac{c}{eH} \frac{\partial S}{\partial p_H} \cos \alpha. \quad (*)$$

Здесь  $\alpha$  — угол, образуемый вектором  $H$  и нормалью  $n$  к поверхности пластины (рис. 1),  $e$  — элементарный заряд,  $S$  — площадь сечения ферми-поверхности (ФП) плоскостью  $p_H = \text{const}$ . В вольтовых металлах это условие обеспечивает максимальные  $\sigma$  и  $\chi$ . Условие (\*) будет вновь выполнено, если поле  $H$  изменится на величину

$$\Delta H = \frac{c}{ed} \frac{\partial S}{\partial p_H} \cos \alpha,$$

к-рой является периодом осцилляции.

Амплитуда осцилляции, напр.  $\sigma_{osc}$ , в сильном поле (радиус кривизны электронных орбит  $r \ll d$ ) убывает с увеличением поля  $H$ . Вклад в  $\sigma_{osc}$  электронов из окрестности т. н. оных точек ФП и электронов с экстремальным значением  $\partial S / \partial p_H \rightarrow (\partial^2 S / \partial p^2 H = 0)$  пропорционален  $H^{-4}$  и  $H^{-3/2}$ . Если грани пластины совпадают с плоскостью симметрии кристалла, то амплитуда  $O$ . З. тем больше, чем выше степень диффузности отражения электронов, т. е. степень несовершенства поверхности проводника. При чисто зеркальном отражении импульсы электронов — падающего ( $p$ ) и отражённого ( $p'$ ) граничной образца — скореллированы и удовлетворяют условию

$$\epsilon(p) = \epsilon(p'); \quad [np] = [np'].$$

В этом случае  $O$ . З. возможны лишь при многоканальном отражении, когда есть неск. неэквивалентных состояний для отражённого электрона.  $O$ . З. при этом формируют также электроны с  $p_H$ , при к-рых изменяется число каналов зеркального отражения.

Для электронов на открытых сечениях ФП следует учитывать дрейф электронов в плоскости, перпендикулярной  $H$ , к-рый не зависит от  $p_H$ . При  $\alpha = \pi/2$  только электроны с открытыми траекториями формируют  $O$ . З. Их смещение в глубь образца за период одинаково во всём слое открытых сечений ФП, и все они участвуют в формировании  $O$ . З. Амплитуда  $O$ . З. не зависит от  $H$  и тем больше, чем выше степень зеркальности отражения электронов (при зеркальном отражении амплитуда в  $l/d$  раз больше, чем при диффузном, где  $l$  — длина свободного пробега электронов).

По периоду осцилляции  $\Delta H$  можно определить величину  $\partial S / \partial p_H$  для электронов, формирующих  $O$ . З., а по величине амплитуды — вероятность зеркального отражения их при разл. углах падения на поверхность проводника.

В проволоках и поликристаллич. образцах амплитуда  $O$ . З. значительно меньше, чем в монокристаллич. пластинах. В проволоках с овальным поперечным сечением (рис. 2, а)  $O$ . З. формируют электроны, дрейфующие вдоль хорды экстремального поперечного сечения ФП, и амплитуда  $O$ . З. в  $(d/r)^{1/2}$  раз меньше, чем в пластинах. В ограниченных проволоках за  $O$ . З. ответственные лишь электроны, дрейфующие вдоль хорд излома поперечного сечения образца (рис. 2, б). Это позволяет изучать рассеивающие свойства локальных участков

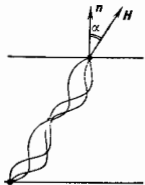


Рис. 1. Траектория электронов с фокусирующим магнитным полем.

поверхности проводника. В поликристаллах амплитуда  $O. \Delta$  уменьшается за счёт усреднения по различным кристаллограф. ориентациям кристаллитов, а период  $O. \Delta$  определяется абс. экстремумом  $\delta S / \delta \rho_{\text{H}}$  при

Рис. 2. Поперечные сечения овальной (а) и угранной (б) проволоки; осциллирующий зондгальванометр формирует электронные дрейфующие вдоль экстремальной хорды  $d$  и вдоль хорд излома  $d_1, d_2, d_3$  параллельных  $H$ .



всезамозможных ориентациях  $H$ . Исключением являются лишь щелевые металлы, ФП к-рых близка к сфере. В этом случае амплитуда  $O. \Delta$  в моно- и поликристаллах практически не различима.

$O. \Delta$  впервые наблюдались в тонких ( $d \ll l$ ) проволоках В. Они используются для уточнения энергетич. спектра электронов проводимости. Возможность разделить вклады в  $O. \Delta$  электронов с близкими характеристиками при  $r \ll d$  позволяет изучать локальные изменения геометрии ФП, вызванные, напр., давлением.

При распространении звуковых или эд.-магн. волн сквозь тонкий проводник  $O. \Delta$  наблюдаются даже в тех случаях, когда размерный эффект в статич. электропроводности отсутствует. В условиях аномального скин-эффекта  $O. \Delta$  могут быть усилены за счёт возникновения слабоатомных волн.

Лит.: Reuter G., Sondheimer E., The theory of the anomalous skin effect in metals, Proc. Roy. Soc., 1948, v. A195, p. 336; Feinberg D., The influence of a transverse magnetic field on the conductivity of thin metallic films, Phys. Rev., 1950, v. 80, p. 401; Babiskin J., Siebelmann P., New type of oscillatory magnetoresistance in metals, Phys. Rev., 1957, v. 107, p. 1249; см. также лит. при ст. Разгерые эффекты. В. Г. Песчанский.

**ОСЬ АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМА** — выделенное направление в антиферромагнетике, коллинеарно к-рому направлены намагниченности магн. подрешёток в осн. состоянии. Направление  $O. a$  в кристалле определяется энергией магн. анизотропии. В кристаллах высокой симметрии может существовать неск.  $O. a$  (см. Антиферромагнетизм).

**ОСЬ ЛЕГКОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ** — направление в кристалле, в к-ром ориентирован вектор намагниченности  $M$  магн. домена в отсутствие внеш. магн. поля  $H$  при термодинамич. равновесии.  $O. l$  н. определяют из условия минимума энергии магнитной анизотропии (МА). Направление, в к-ром энергия МА максимальна, наз. осью трудного намагничивания.  $O. l$  н. является двусторонней, т. е. вектор  $M$  может быть ориентирован вдоль оси как в положительн., так и в отрицат. направлении. В кристаллах достаточно высокой симметрии может быть неск. эквивалентных  $O. l$  н. (так, в кристаллах кубич. симметрии имеются три эквивалентные  $O. l$  н. — трёхосная анизотропия). Кроме того, могут быть неэквивалентные  $O. l$  н. для гексагональных, тетрагональных и ромбоэдрич. кристаллов часто используют термины «лёгкая ось» и «лёгкая плоскость» ( $M$  лежит в базисной плоскости), поскольку анизотропия четырёх- и шестого порядков в базисной плоскости обьёкта мала.

Количественной характеристикой «трудности» намагничивания является поле анизотропии  $H_A$  — значение поля  $H$ , при к-ром намагниченность достигает максимума в трудном направлении. В магнитно-жестких редкоземельных соединениях  $H_A$  достигает  $10^5$ – $10^6$  Э.

Существование  $O. l$  н. может быть обусловлено дипольными взаимодействиями или анизотропией электрич. поля кристалла, ориентрующего орбитальные моменты электронов относительно кристаллограф. осей. Спин-орбитальное взаимодействие стремится расположить спиновые моменты коллинеарно орбитальным. В случае незамоороженных орбитальных моментов (ред-

коземельные элементы) энергия МА определяется непосредственно *внутрикристаллическим полем*. При «замороженных» орбитальных моментах (в магнетиках, в к-рых ионы имеют недоразрешённые электронные д-оболочки) она связана и с величиной спин-орбитального взаимодействия.

В нек-рых магнетиках, обладающих сложной магнитной атомной структурой, направление  $O. l$  н. может изменяться с темп.-рой. Так, напр., в соединениях  $RCO_3$  ( $R$  — редкоземельный металл) наблюдаются т. н. ориентационные фазовые переходы, при к-рых  $O. l$  н. выходит из плоскости базиса и располагается по гексаго-

Ось лёгкого намагничивания некоторых  $3d$ - и  $4f$ -магнитных металлов

Сигнотия	Кубическая	Гексагональная		
Металл . . .	Fe, Ni	Co, Gd, Er, Tm	Tb, Ho	Dy
$O. l$ н. . .	[100] [111]	[0001], т. е. ось $c$	[2130] ось $b$	[1010] ось $a$

нальной оси  $c$ . Этот эффект связан с конкуренцией констант анизотропии магн. подрешёток  $Co$  и редкоземельного металла.

Лит.: Вонсовский С. В., Магнетизм, М., 1974; Кричич Г. С., Физика магнитных явлений, 2 изд., М., 1985, с. 154; Современная кристаллография, т. 4 — Физические свойства кристаллов, М., 1981. Ю. П. Иркин.

**ОТБОРА ПРАВИЛА** — устанавливают допустимые квантовые переходы между уровнями энергии квантовой системы (атома, молекулы, кристалла, атомного ядра, элементарной частицы) при изложении на неё внеш. возмущения. Если состояния системы характеризуются с помощью квантовых чисел, то  $O. п.$  определяют их возможные изменения при квантовых переходах рассматриваемого типа. Математически  $O. п.$  определяют отличные от нуля матричные элементы гамильтониана возмущённой системы в базисе собств. ф-ций невозмущённой системы и являются следствием инвариантности гамильтониана (или лагранжиана) относительно преобразований группы симметрии системы и соответствующих сохранённых законов. В частности,  $O. п.$  для электрич. дипольных переходов в атоме или молекуле определяют ненулевые матричные элементы оператора взаимодействия дипольного момента системы  $d$  с электрич. вектором  $E$  эд.-магн. поля в базисе собств. ф-ций гамильтониана невозмущённой системы, а т. к.  $E$  не зависит от внутр. параметров системы,  $O. п.$  определяют ненулевые матричные элементы дипольного момента системы.  $O. п.$  вводят и в случае приближённого описания системы; при этом они устанавливают, для каких переходов матричные элементы точного гамильтониана в базисе приближённых волновых ф-ций отличны от нуля.

Различают строгие и приближённые  $O. п.$  Квантовый переход наз. запрещённым, если нарушается хотя бы одно  $O. п.$  Строгие  $O. п.$  обусловлены симметрией системы и строгими законами сохранения и налагают абс. запреты на квантовые переходы. Приближённые  $O. п.$  характеризуют переходы между уровнями энергии, к-рые описываются приближёнными законами сохранения. Квантовое число полного угл. момента атома ( $J$ ) или молекулы ( $F$ ) является точным, т. к. полный угл. момент является инвариантом группы вращения, поэтому  $O. п.$  для  $J$  (или  $F$ ) — строгие. В случае электрич. дипольных переходов возможны изменения квантовых чисел:  $\Delta J = J - J' = 0, \pm 1$  и  $\Delta M = M - M' = 0, \pm 1$  (где  $J, J'$  — квантовые числа полного момента атома в начальном и конечном состояниях,  $M, M'$  — квантовые числа проекции полных моментов на к.-л. ось). Для электрич. квадрупольных переходов  $\Delta J = 0, \pm 1, \pm 2$  ( $J + J' \geq 2$ ),  $\Delta M = 0, \pm 1, \pm 2$ .

В случае, когда не учитываются слабые взаимодействия,  $O. п.$  по чётности состояний (+ ↔ − для электрич. дипольных переходов и + ↔ + и − ↔ − для электрич. квадрупольных переходов и т. д.) также являются стро-

гнии. О. п. нарушаются в сильных внеш. полях за счёт поляризуемости атома или молекулы или при многофотонном поглощении (см. *Многочисленные процессы*).

Для атома существуют и др. строгие О. п. Для электрич. переходов разл. мультипольности  $\kappa$  изменение орбитального квантового числа  $\Delta l = 0, \pm 1, \dots, \pm \kappa$  ( $l + l' + \kappa$  — чётное число;  $l$  и  $l'$  — орбитальные квантовые числа атомного электрона в начальном и конечном состояниях), для магн. переходов  $\Delta l = 0, \pm 1, \dots, \pm (\kappa - 1)$  ( $l + l' + \kappa$  — нечётное число). Для электрич. дипольных переходов  $\Delta l = \pm 1$ , т. е. такие переходы возможны между конфигурациями разл. чётности (правило Лапорта), а для электрических квадрупольных переходов  $\Delta l = 0, \pm 2$  (за исключением переходов  $n \rightarrow n'$ ). О. п. для проекции полного момента важны для определения поляризации спектральных линий испускания.

В атомах, где осуществляется приближённый тип связи, квантовые переходы подчиняются приближённым О. п. Так, в случае LS-связи кроме перечисленных должны выполняться след. О. п.: для электрич. переходов

$$\Delta L = 0, \pm 1, \dots, \pm \kappa, L + L' \geq \kappa, \\ \Delta S = 0;$$

для магн. переходов

$$\Delta L = 0, \pm 1, \dots, \pm (\kappa - 1), L + L' \geq \kappa - 1, \\ \Delta S = 0, \pm 1, \dots, \pm (\kappa - 1), S + S' \geq \kappa - 1.$$

В случае электрич. дипольных переходов  $\Delta L = 0, \pm 1$  (исключая переходы  $S \rightarrow S'$ ) и  $\Delta S = 0$ . Для электрич. квадрупольных переходов  $\Delta L = 0, \pm 1, \pm 2$  ( $L + L' \geq 2$ ), т. е. переходы между двумя S-уровнями ( $L = L' = 0$ ) и между S- и P-уровнями ( $L = 0, L' = 1$ ) запрещены. О. п. по спину S и S' одно и то же для всех электрич. переходов разл. мультипольности; оно разрешает переходы лишь между уровнями одинаковой мультипольности. Вероятность магн. дипольного перехода в  $\kappa^2 = = (137)^{-2}$  раз меньше вероятности электрич. дипольного перехода той же частоты.

О. п. имеют место и для переходов между состояниями в атомных системах с др. типами связей (LK-, jK-, jj-связи и др.). Нарушение О. п. обусловлено магн. взаимодействием, гл. обр. *спин-орбитальным взаимодействием* (см., напр., *Интеркомбинационные квантовые переходы*).

В молекулах чисто вращательные переходы подчиняются О. п. для изменения проекции полного угл. момента (характеризуется квантовым числом K) на выделенную ось симметрии молекулы. Так, для молекул типа жёсткого симметричного волчка  $\Delta K = 0$  в поглощении. Однако центробежное искажение и эффекты колебательно-вращат. взаимодействия (*вибронного взаимодействия*) существенно ослабляют это О. п. В частности, в спектрах молекул симметрии  $C_{2v}$  в осн. состоянии разрешаются переходы с  $\Delta K = \pm 3, \pm 6$  т. д. (вероятность переходов с  $\Delta K = \pm 6$  в 4 порядка меньше, чем переходов с  $\Delta K = \pm 3$ ), а в вырожденных вибронных состояниях возможны и переходы с  $\Delta K = \pm 1, \pm 2$  т. д. Для молекул типа асимметричного волчка О. п. по  $\Delta K$  теряют смысл.

Для чисто колебат. переходов как в поглощении (в испускании), так и при *комбинационном рассеянии* (св. гармонические квантовые числа  $v$  и  $l$  могут изменяться на  $\pm 1$  (осн. полоса), но при учёте механич. и эл.-оптич. ангармонизма колебаний молекулы становится разрешёнными и переходы с высокими значениями  $v$  и  $l$  (обертон. суммарные и разностные полосы).

В общем случае многоатомной молекулы электронные уровни энергии могут классифицироваться только по типу симметрии соответствующей точечной или переставочно-инверсионной группы (см. *Симметрия молекул*) и по спину. Переход между электронными

уровнями энергии типов симметрии  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  разрешён, если прямое произведение  $\Gamma_1 \times \Gamma_2$  содержит тип симметрии дипольного (или квадрупольного) момента молекулы. Т. к. электрич. дипольный момент молекулы не зависит от спина, при электрич. дипольном переходе спин электрона не меняется (интеркомбинац. запрет). Однако, как и в атоме, спин-орбитальное взаимодействие снимает этот запрет. В частности, переходы на первое возбуждённого триплетного состояния в основном приводят к возникновению *флуоресценции*. При наличии вибронного взаимодействия О. п. можно определять только для переходов между вибронными состояниями.

Дипольные электронные переходы в линейных молекулах подчиняются О. п.  $\Delta \Lambda = 0, \pm 1$  ( $\Lambda$  — квантовое число проекции полного орбитального момента на ось молекулы). Если при электронном переходе молекула изгибается (линейно-изогнутые переходы), то могут возникать вращат. переходы с  $\Delta K > 0$ .

Лит.: Никитин А. А., Рудынский З. Б., Основы теории спектров атомов и молекул, М., 1983; Гердберг Г. Э., Электронные спектры и строение многоатомных молекул, М., 1969.

М. Р. Ахмед, В. П. Шемалко.

О. п. для элементарных частиц распределяются на группы, соответствующие свойствам симметрии разл. типов взаимодействий: сильного, эл.-магн., слабого. Сохранение электрич. заряда, энергии, импульса и полного угл. момента системы является точным для всех типов взаимодействий. В перечисленных взаимодействиях сохраняются также *барионное число*  $B$  ( $\Delta B = 0$ ) и, по-видимому, три типа *лептонных чисел*  $L$  — электронное  $L_e$ , мюонное  $L_\mu$  и тау-лептонное  $L_\tau$  ( $\Delta L_e = \Delta L_\mu = \Delta L_\tau = 0$ ). (О возможном несохранении лептонных чисел, проявляющемся в нейтринных осцилляциях, см. *Нейтрино*.)

Следствием *изотопической инвариантности* сильного взаимодействия являются О. п. по изотопии, спину:  $\Delta I = 0, \Delta I_3 = 0$  для переходов, вызываемых этим взаимодействием. Всякая система адронов может быть однозначно представлена в виде суперпозиции состояний, имеющих определ. значение  $I$ , т. е. разложена по неприводимым представлениям изотопич. группы. Если в различных начальном и конечном состояниях системы имеются совпадающие неприводимые представления (т. е. одинаковыми  $I$ ), то реакция разрешена. В дополнении к правилам  $\Delta I = 0, \Delta I_3 = 0$  существуют ограничения, связанные с обращением в нуль *Клебша — Гордана коэффициентов*. Так, напр., в реакции распада  $\rho$ -мезона ( $I = 1, I_3 = 0$ ) на два  $\pi$ -мезона в различении конечного состояния имеются неприводимые представления с  $I = 0, 1, 2$ . Наличие представления с  $I = 1$  делает распад возможным. Однако из двух непротиворечащих правилу  $\Delta I_3 = 0$  состояний —  $\pi^+\pi^-$  и  $\pi^0\pi^0$  — осуществляется лишь первое, т. к. коэф. Клебша — Гордана обращаются для второго на них в нуль. Изотопич. инвариантность нарушается эл.-магн. и слабыми взаимодействиями.

Сильное и эл.-магн. взаимодействия сохраняют пространственную чётность  $P$  (см. *Чётность*) и *зарядовую чётность*  $C$ . Сохранение  $G$ -чётности в сильном взаимодействии является следствием изотопич. инвариантности и сохранения зарядовой чётности.

В сильном и эл.-магн. взаимодействиях сохраняются кварковые *ароматы*, откуда следует строгое О. п. для *странности, очарованья, прелести* и аромата  $i$ -кварка (пока экспериментально не открытого):  $\Delta S = 0, \Delta C = 0, \Delta b = 0, \Delta i = 0$ .

В слабом взаимодействии, не сохраняющем по отдельности ни  $P$ -, ни  $C$ -чётности, имеется приближённое сохранение  $CP$ -чётности (см. *CP-инвариантность*) (степень нарушения  $CP$ -чётности в распадах  $K$ -мезонов составляет ок.  $10^{-8}$ ).

Слабое взаимодействие, вызываемое *заряженным током*, либо изменяет на единицу странность, очарование и прелесть:  $\Delta S = \pm 1, \Delta C = \pm 1, \Delta b = \pm 1$  квантовых

систем, либо не меняет их, если ни в начальном, ни в конечном состояниях не присутствует кварк с соответствующим ароматом. Слабое взаимодействие, вызываемое нейтральным током, не меняет ароматы. Указанные  $O. п.$  естеств. образом вытекают из представлений о кварковом составе адронов и общей структуре слабого взаимодействия. В осцилляциях каонов, в  $K$ -рых странность меняется на две единицы, требуется участие двух  $W$ -бозонов; в этом смысле во взаимодействии дважды участвует заряд. ток.

В полунтоновых распадах частиц, происходящих без изменения странности, справедливы  $O. п.$ :  $\Delta Q = -\Delta I_3 = \pm 1$ ,  $|\Delta I| = 1$ , где  $\Delta Q$  — изменение эл. заряд. адронов. В распадах с изменением странности  $\Delta Q = \Delta S = \pm 1$ ,  $\Delta I_3 = 1/2$ ,  $|\Delta I| = 1/2$ . Эти  $O. п.$  вытекают из постулатов теории Кабиббо (см. *Аксиальный ток частичное сохранение. Векторного тока сохранение*).

В моделях великого объединения неизбежны взаимодействия, нарушающие сохранение барионного и лептонного чисел. Однако в модели, основанной на калибровочной группе  $SU(5)$ , имеется точное сохранение числа  $(B-L)$ , вследствие чего в ней запрещены нейтральные осцилляции  $p \rightarrow \pi$ , допускаемые в др. моделях. Несохранение барионного и лептонного чисел возможно также при поглощении частиц чёрными дырами.

Лит.: Окулы В. В., Лептон и кварки, 2 изд., М., 1990.

С. П. Боровой.

**ОТВЕРДЕВАНИЯ ПРИНЦИП** — одно из исходных положений статик, согласно к-рому состояние равновесия изменяемой механич. системы не нарушается при отвердевании системы. К изменяемому относится система *материальных точек*, связанных между собой силами взаимодействия, системы твёрдых тел, соединённых шарнирами, стержнями или нитями, и системы частиц деформируемой среды — жидкости или газа. Если изменяемая система находится в равновесии, то это состояние равновесия не может быть нарушено присоединением дополнит. связи между точками или телами системы.  $O. п.$  является обобщением результатов наблюдений и практики и поэтому входит в число исходных положений учения о равновесии тел. На основании  $O. п.$  в число необходимых (во недостаточных) условий равновесия изменяемой или деформируемой системы должны включаться те условия, к-рые имеют место при равновесии абсолютно твёрдого тела, получаемого из изменяемой системы с помощью отвердевания (путём замены нежёстких связей жёсткими). Этим результатом широко пользуются в инженерной практике при изучении равновесия изменяемых систем.

**ОТКРЫТАЯ СИСТЕМА** — термодинамич. система, к-рая обменивается с окружающей средой веществом, энергией и импульсом. К наиб. важному типу  $O. с.$  относятся хим. системы, в к-рых непрерывно протекают хим. реакции (завне поступают реагирующие вещества и отводятся продукты реакций). Биол. системы (живые организмы) можно также рассматривать как открытые хим. системы. Такой подход позволяет исследовать процессы их жизнедеятельности и развития на основе термодинамики неравновесных процессов, физ. и хим. кинетики.

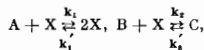
Свойства  $O. с.$  описываются наиб. просто вблизи состояния термодинамич. равновесия. Если отклонение  $O. с.$  от термодинамич. равновесия мало, то неравновесное состояние можно охарактеризовать теми же параметрами, что и равновесное: темп-рой, хим. потенциалами компонентов системы и др. (во ис с постоянными для всей системы значениями, а с зависящими от координат и времени). Степень неупорядоченности таких  $O. с.$ , как и систем в равновесном состоянии, характеризуется энтропией. Энтропия  $O. с.$  в неравновесном (локально-неравновесном) состоянии определяется, в силу аддитивности энтропии, как сумма значений энтропии отд. малых элементов системы, находящихся в локальном равновесии (см. *Локальное термодинамическое равновесие*).

Отклонения термодинамич. параметров от их равновесных значений (термодинамич. с. п. л.) вызывают в системе поток энергии вещества (см. *Перенос явления*). Процессы переноса приводят к росту энтропии системы (*производство энтропии*).

Согласно второму началу термодинамики, в замкнутой изолиров. системе энтропия, возрастая, стремится к своему равновесному макс. значению, а произв-во энтропии — к нулю. В отличие от замкнутой системы, в  $O. с.$  возможны стационарные состояния с пост. энтропией при пост. произв-ве энтропии, к-рая должна при этом отводиться от системы. Стационарное состояние характеризуется постоянством скоростей хим. реакций и переноса реагирующих веществ и энергии. При таком «проточном равновесии» произв-во энтропии в  $O. с.$  минимально (*Пригожина теорема*). Стационарное неравновесное состояние играет в термодинамике  $O. с.$  такую же роль, какую играет термодинамич. равновесие в термодинамике равновесных процессов. Энтропия  $O. с.$  в этом состоянии хотя и поддерживается постоянной (произв-во энтропии компенсируется её отводом), но это стационарное значение энтропии не соответствует её максимуму (в отличие от замкнутой изолиров. системы).

Наиб. интересные свойства  $O. с.$  выявляются при нелинейных процессах, когда в  $O. с.$  возможно осуществление термодинамически устойчивых неравновесных (в частном случае стационарных) состояний, далёких от состояния термодинамич. равновесия и характеризующихся определённой пространственной или временной упорядоченностью (структурой), к-рую наст. диссипативной т. к. её существование требует непрерывного обмена веществом и энергией с окружающей средой. Нелинейные процессы в  $O. с.$  и возможность образования *диссипативных структур* исследуют на основе ур-ний хим. кинетики: баланса скоростей хим. реакций в системе со скоростями подачи реагирующих веществ и отвода продуктов реакций. Накопление в  $O. с.$  активных продуктов реакций или теплоты может привести к автоколебательному (самоподдерживаемому) режиму реакций. Для этого необходимо, чтобы в системе реализовалась положительная обратная связь: ускорение реакции под воздействием либо её продукта (хим. автокатализа), либо теплоты, выделяющейся при реакции. Подобно тому как в колебат. контуре с положит. обратной связью возникает устойчивые саморегулирующиеся неаутоколеблющиеся колебания (*автоколебания*), в хим.  $O. с.$  с положит. обратной связью возникает неаутоколеблющиеся саморегулирующиеся хим. реакции. Автокаталитич. реакция могут привести к неустойчивости хим. процессов в однородной среде и к появлению у  $O. с.$  стационарных состояний с упорядоченным в пространстве неоднородным распределением концентраций. В  $O. с.$  возможны также концентрат. волны сложного нелинейного характера (*автоволны*). Теория  $O. с.$  представляет особый интерес для понимания физ.-хим. процессов, лежащих в основе жизни, т. к. живой организм — это устойчивая саморегулирующаяся  $O. с.$ , обладающая высокой организацией как на молекулярном, так и на макроскопич. уровне. Подход к живым системам как к  $O. с.$ , в к-рых протекают нелинейные хим. реакции, создаёт новые возможности для исследования процессов молекулярной самоорганизации на ранних этапах появления жизни.

Примером  $O. с.$  может служить система с четырьмя сортами молекул  $A, B, C, X$ , между к-рыми возможны две хим. реакции по схемам



где стрелками обозначают прямую и обратную реакции,  $k_1, k_2, k_1', k_2'$  — константы скоростей прямой и обратной реакций. Концентрации  $a, b, c$  молекул  $A, B, C$  и константы скоростей реакций поддерживаются постоянными

ми за счёт подвода и отвода вещества и тепла, что характерно для О. с. На практике, если кол-во веществ А, В, С велико по сравнению с кол-вом веществ X, то их концентрация можно считать постоянными.

Концентрация  $n$  веществ X может зависеть от времени  $t$  за счёт протекания хим. реакций. Из двух ур-ний баланса веществ в реакциях (с учётом действующего масс закона) следует, что

$$dn/dt = (k_1a - k_2b)n - k_3bn^2 + k_4c. \quad (1)$$

Из ур-ния (1) вытекает, что при  $k_2' = 0$  и  $k_1a = k_2b$  величина  $n$  при любом нач. условии с ростом  $t$  стремится к нулю как  $n = n_0(1 + ik_1bn_0t)^{-1}$ , где  $n_0$  — нач. значение концентрации  $n$ . В этом же случае при  $k_1a < k_2b$  в пределе  $n$  также стремится к нулю, но эквивалентно, а при  $k_1a > k_2b$  величина  $n$  стремится к постоянному предельному значению, зависящему от соотношения коэф. в (1):  $n_{\infty} = (k_1a - k_2b)/k_1b$ . Наличие неск. предельных стационарных состояний является характерным свойством О. с., связанным с тем, что они описываются нелинейными дифференц. ур-ниями. Упрощённая модель одномодового лазера также описывается ур-нием типа (1) для числа возбуждённых атомов  $n$  при  $k_2' = 0$  с коэф., зависящими от коэф. усиления и затухания вследствие потерь в лазере.

Учёт явлений диффузии в ур-ниях баланса хим. реакций приводит к дополнит. членам  $D \partial^2 n / \partial x^2$  ( $D$  — коэф. диффузии,  $x$  — пространственная координата), откуда следует, что в стационарных состояниях таких О. с. концентрации  $n(x)$  пространственно неоднородны, кроме того, при определ. условиях в них могут существовать области, где  $n(x)$  испытывает простран. осцилляции (диссипативные структуры).

Др. примером О. с. является экологич. система «хищник—жертва», к-рая описывается ур-ниями Лотки—Вольтерры (ур-ния баланса числа «жертв»  $n_1$  и «хищников»  $n_2$ ):

$$dn_1/dt = \alpha_1 n_1 - \alpha_2 n_1 n_2, \quad dn_2/dt = -\beta_2 n_2 + \beta_1 n_1 n_2, \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \beta_2$  характеризуют скорости возрастания популяции «жертв» при отсутствии «хищников» и убывания «хищников» при отсутствии «жертв». Коэф.  $\alpha, \beta$  характеризуют скорости гибели «жертв» из-за наличия «хищников» и возрастания «хищников» из-за наличия «жертв». Коэф. считаются постоянными, это означает, в частности, что запасы пищи для «жертв» достаточно велики или восполняются.

Такая экологич. система имеет два положения равновесия  $n_1 = n_2 = 0$  и  $n_{10} = \beta_2/\beta_1, n_{20} = \alpha_1/\alpha_2$ . Относительные числа «жертв» и «хищников»  $u = n_1/n_{10}, v = n_2/n_{20}$  удовлетворяют

$$dv/du = av(u-1)/(u-v), \quad a = \beta_2/\alpha_1,$$

к-рое имеет решение

$$au + v - \ln(u^a v) = H = \text{const.}$$

Ур-ния (2) имеют периодич. решения, к-рым соответствуют предельные циклы, изображённые на фазовой плоскости (рис.). Эти решения описывают периодич. колебания числа «жертв» и «хищников». Возможность таких неустойчивых нелинейных колебаний является важным свойством О. с.

Гидродинамич. системы в турбулентном состоянии являются также примером О. с. В них возможны стационарные состояния с сильными флуктуациями из-за баланса импульса с учётом его переноса, вызванного неоднородностями флуктуаций скоростей, и баланса флуктуаций скоростей с учётом их релаксации и диффузии.

Открытый характер системы связан с тем, что градиент давления, обуславливающий турбулентный поток, и темп-ра поддерживаются постоянными.

Теория О. с. — одно из направлений общей теории систем, к к-рым относится, напр., рассматриваемые в кибернетике системы переработки информации, транспортные узлы, системы энергоснабжения и др. Подобные системы, хотя и не являются термодинамическими, описываются системой ур-ний баланса, в общем случае нелинейных и сходных с аналогичными ур-ниями для физ.-хим. и биол. О. с. Для всех подобных систем существуют общие проблемы регулирования и оптим. функционирования.

Лит.: Зубарев Д. Н., Неравновесная статистическая термодинамика, М., 1971; Глазев С. Ф., Пригожин И., Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций, пер. с англ., М., 1975; Волквинштейн Я. М. В., Биология и физика, «УФН», 1973, т. 109, с. 489; Пригожин И., Никольский Ж., Биологический порядок. Структура и неустойчивости, пер. с англ., там же, с. 517; Эйген М., Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул, пер. с англ., М., 1973; Магри Д. и др., Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. Лекция о моделях, пер. с англ., М., 1983; Хакин Г., Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах, пер. с англ., М., 1985.

**ОТКРЫТЫЕ ЛОУШКИ** — разновидность турбулентной плазмы, характеризующаяся наличием в определённом объёме пространств, ограниченном в направлении вдоль поля, в отличие от замкнутых лопушек (токамаков, стеллараторов), имеющих форму тороида (для О. л. характерна линейная геометрия, причём силовые линии магн. поля пересекают торцевые поверхности плазмы (с последним обстоятельством и связано происхождение термина «О. л.» — они «открыты» с торцов).

О. л. имеют ряд потенц. преимуществ по сравнению с замкнутыми: они проще в инженерном отношении, в них более эффективно используется энергия удерживающего плазму магн. поля, легче решается проблема удаления из плазмы тяжёлых примесей и продуктов термоядерной реакции, при равновесности О. л. могут работать в полностью стационарном режиме. Однако возможность реализации этих преимуществ в термоядерном реакторе на основе О. л. требует ещё экстрем. доказательств.

**Пробиротрон** — наиб. распространённый тип О. л. (рис. 1, а). Предложен в нач. 1950-х гг. независимо

а Г. И. Будкером и Р. Постом (R. Post). Участки сильного магн. поля на концах этой лопушки удерживают плазму, поэтому их наз. магн. пробками.

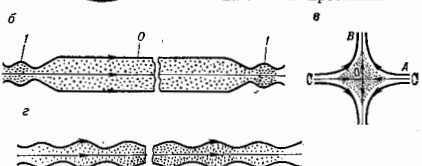


Рис. 1. Различные типы открытых магнитных лопушек (точками показана плазма): а) — пробиротрон; б) — амбилолларная лопушка (О — длинный центральный пробиротрон, Д — короткие концевые пробиротроны); в — амбилолларная (Н — нуль магнитного поля, А — осевая щель); в — осяевая щель; з — многополюсная лопушка.

Удержание частицы в пробиротроне обусловлено адiabатич. инвариантностью её магн. момента, имеющей место в условиях, когда ларморовский радиус частицы мал по сравнению с масштабом изменения магн. поля (см. Адиабатические инварианты). В перелетившемся приближении магн. момент частицы  $\mu = mv_{\perp}^2/2H$ , 489

где  $H$  — напряжённость магн. поля, а  $m$  и  $v_{\perp}$  — масса и перпендикулярная магн. полю составляющая скорости частицы. Из адиабатич. инвариантности  $\mu$  и закона сохранения энергии частицы  $\mathcal{E} = m(v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2)/2$  следует, что при условии  $\mu H_{\max} > \mathcal{E}$  (где  $H_{\max}$  — макс. значение магн. поля в пробках) частица отражается от пробки и совершает финитное движение внутри ловушки.

Если обозначить индексом «0» значения всех величин в минимуме магн. поля, то условие  $\mu H_{\max} > \mathcal{E}$  можно записать в виде

$$R = \frac{H_{\max}}{H_0} > \frac{v_{\parallel 0}^2 + v_{\perp 0}^2}{v_{\perp 0}^2}. \quad (1)$$

Величину  $R$  наз. «пробочным отношением». Из условия (1) следует, что при данном соотношении полей  $H_{\max}$  и  $H_0$  в ловушке удерживаются только те частицы, вектор скорости к-рых лежит в пространстве скоростей вне конуса потерь [конуса с осью, параллельной магн. полю, и с углом при вершине  $\alpha = \arcsin(1/\sqrt{R})$ ].

В осесимметричном пробочном плазме, как правило, подвержена *желобковой неустойчивости*, приводящей к просачиванию плазмы поперёк магн. поля в виде узких языков. Неустойчивость возникает потому, что в таком пробочном модуле магн. поля падает в радиальном направлении, а плазме энергетически выгодно перемещаться в область слабого поля. Для стабилизации желобковой неустойчивости применяются неосесимметричные магн. поля, имеющие абс. минимум  $H$  в области удержания.

Пробочторы заполняют горячей плазмой, инжектируя быстрые атомы водорода. Проникая поперёк магн. поля в плазму, они захватываются там вследствие ионизации и перезарядки и обеспечивают поддержание материального и энергетич. баланса плазмы. Таким методом в пробочнике 2ХПВ в Ливерморской лаборатории (США) в 1976 получена квазиэлектронная плазма с плотностью  $\approx 10^{14}$  см $^{-3}$  и темп-рой ионов  $T_i \approx 10^8$  К.

Угругие столкновения ионов плазмы друг с другом приводят к их рассеянию, попаданию в конус потерь и выходу из пробочника. Расчёты показывают, что определяемое этим процессом время  $\tau$  жизни плазмы в пробочнике может быть оценено по ф-ле

$$\tau \sim \tau_i \lg R, \quad (2)$$

где  $\tau_i$  — время рассеяния иона на угол порядка единицы. Эта оценка справедлива в условиях, когда длина пробочника мала по сравнению с длиной свободного пробега ионов  $\lambda_i$ .

Время рассеяния электронов  $\tau_e$  очень мало по сравнению с  $\tau_i$ , и поэтому ф-ция распределения электронов близка к максвелловской. В частности, она изотропна, т.е. значит. часть электронов находится в конусе потерь и могла бы вылететь из ловушки через пробки. В таких условиях квазинейтральность плазмы обеспечивается возникающим в ней амбиоплярным электр. полем, препятствующим потерям электронов. Распределение амбиоплярного потенциала вдоль векторной силовой линии магн. поля даётся ф-лой

$$\varphi = \text{const} + \frac{T_e}{e} \ln n, \quad (3)$$

где  $T_e$  — темп-ра электронов,  $n$  — локальная плотность плазмы. Амбиоплярное электр. поле приводит к дек-рому ускорению удержания ионов.

К большому дополнит. уменьшению времени жизни ионов приводит их рассеяние на надтепловых флукутирующих электр. полях, к-рые могут возникать вследствие анизотропии ионной ф-ции распределения (анизотропия связана с отсутствием ионов в конусе потерь). Относительно малое время жизни в пробочнике делает перспектив. применения таких систем

в качестве термоядерных реакторов не слишком благоприятными. В связи с этим в равное время были предложены неск. усовершенствованных типов О. д., основанных на идее пробочника.

**Амбиоплярная ловушка.** Одна из возможностей повышения времени удержания ионов связана с использованием амбиоплярного электр. поля. К длинному пробочнику  $O$  (рис. 1, б) с плазмой умеренной плотности с каждой стороны присоединяется по короткому пробочнику  $I$ , в к-рых с помощью интенсивной инжекции высокоэнергетич. нейтральных атомов поддерживается высокая плотность плазмы. Тогда в соответствии с (3) между центральным и крайними пробочниками возникает разность потенциалов, равная  $(T_e/e) \ln(n_1/n_0)$ , и для ионов центр. пробочника появляется эл.-статич.

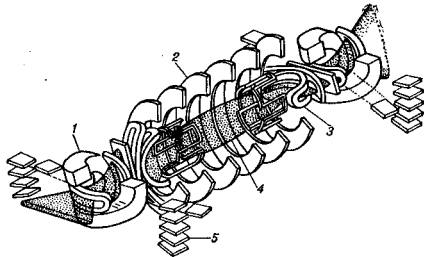


Рис. 2. Схема амбиоплярной ловушки ТМХ: 1 — аксиально-несимметричная обмотка концевых пробочников, обеспечивающая минимум магнитного поля  $H$  на оси; 2 — обмотка центрального соленоида; 3 — переходные обмотки; 4 — инжекторы нейтральных атомов. Характерная «веревная» форма плазмы вблизи концов установив. обусловлена свойствами магнитного поля уставки. В центральном соленоиде сечение плазмы круглое.

потенц. яма. При достаточно большом перепаде плотности глубина ямы будет столь велика, что потери ионов из центр. пробочника станут пренебрежимо малыми. Разумеется, поддержание высокой плотности плазмы в концевых пробочниках требует определ. энергетич. затрат, но эти затраты не зависят от длины центр. пробочника. А т.к. мощность термоядерного энерговыделения в нём пропорц. его длине, то, делая центр. пробочник достаточно длинным, можно обеспечить положит. энергетич. баланс системы в целом.

В экспериментах на ряде амбиоплярных ловушек в кон. 70-х — нач. 80-х гг. было показано, что амбиоплярное удержание ионов центр. пробочника действительно существует. При создании нужного распределения плотности время жизни ионов центр. пробочника возрастало в  $\sim 10$  раз по сравнению с оценкой (2). Параметры плазмы центр. пробочника были при этом довольно умеренными (в установке ТМХ, схема к-рой приведена на рис. 2,  $T_i \approx 100$  эВ,  $n_i \sim 10^{13}$  см $^{-3}$ ).

Трудности повышения параметров плазмы в амбиоплярных ловушках связаны с ф-цией обр. с возможностью усиленного рассеяния ионов концевых пробочников на надтепловых флукутирующих.

Неосесимметричные магн. поля, используемые для стабилизации желобковой неустойчивости, могут быть источником усиленного поперечного переноса плазмы, напоминающего неоклаасич. перенос в замкнутых ловушках. Поэтому необходимо отыскать топологически сложные осесимметричные магн. конфигурации, в к-рых плазма была бы устойчива по отношению к желобковым возмущениям.

Т.н. **антипробочник**, возникающий при «встречном» включении двух соосных магн. катушек (рис. 1, в), — одна из обладающих таким свойством конфигураций.

Модуль магн. поля в этой ловушке обладает абс. минимумом в центре системы, во этот минимум равен нулю. Соответственно, вблизи центра антипробиротрона нарушается адiabатич. инвариантность  $\mu$ , и плазма в этой области быстро теряется вдоль силовых линий. Для устранения этих потерь можно использовать в осевой  $A$  и кольцевой  $B$  щелях антипробиротрона систему спец. электродов, предотвращающих потери электронов. Удержание ионов будет тогда обеспечено собств. амбиоллярным потенциалом плазмы. Техн. ограничения затрудняют экстраполяцию этой схемы к реакторным параметрам плазмы. Возможно, антипробиротрон выйдет применение в качестве стабилизирующего элемента в амбиоллярных ловушках.

Совсем др. возможности увеличения времени удержания связаны с переходом к О. д. с длиной  $L$ , превышающей длину свободного пробега ионов. Пример систем такого типа — многопробочная ловушка (МПЛ), предложенная в нач. 70-х гг. Установка имеет вид щелчки связанных между собой пробиротронов (рис. 1, а), причём длина каждого меньше  $\lambda_d$ . В такой О. д. время жизни плазмы возрастает в  $(L/\lambda_d)^2$  раз по отношению к оценке (2).

Др. установка, относящаяся к этому классу, — т. н. гаодинамич. ловушка (ГДЛ), представляющая собой пробиротрон с большим пробочным отношением ( $R = = 50-100$ ) и с длиной  $L > \lambda_d/R$ . Время жизни плазмы в ГДЛ в  $LR/\lambda_d$  раз больше оценки (2). Особенность ГДЛ состоит в том, что желобчатая неустойчивость в ней может быть подавлена даже в простой осесимметричной конфигурации магн. поля.

Достоинством О. д. с  $L > \lambda_d/R$  (МПЛ, ГДЛ) является то, что продольные потери плазмы из них не зависят от микрофлуктуаций, недостатком — то, что длина таких установок (в реакторном варианте) относительно велика.

Лит.: Ч у я н о в В. А., Адиабатические магнитные ловушки, в кн.: Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы, т. 1, М., 1980; Ч у я н о в В. В., Динамика частиц в магнитных ловушках, в сб.: Вопросы теории плазмы, в. 13, М., 1984; Р ю т о в Д. Д., С т у п а н о в Г. В., Процессы переноса в осесимметрично-несимметричных открытых ловушках, там же; Д а с к р о в В. П., Классические продольные потери плазмы в открытых адиабатических ловушках, там же; Р ю т о в Д. Д., Открытые ловушки, «УФН», 1988, т. 154, с. 565; Д. Д. Р ю т о в.

**ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР** — колебательная система, состоящая из отражателей (напр., в случае эл.-магн. волн металл. или диэлектрич. зеркал), осуществляющих путём многократных отражений волновых пучков локализацию (удержание) резонансных волновых полей в конечной области пространства. Обычно характерные размеры О. р. заметно превышают длины волн ( $d \gg \lambda$ ) возбуждаемых колебаний, что во мн. случаях позволяет исследовать свойства О. р. в приближении квазиоптики. При этом поляризация поля несущественна, а описание О. р. универсально и пригодно для колебаний любой природы — эл.-магн., акустических и т. п. Практически первым вариантом О. р. стала система из двух плоскостепенных зеркал конечных размеров (предложена *интерферометра Фабри — Перо*). Предложенная А. М. Прохорова (А. Л. Schawlow) и Ч. Таунсом (Ch. Townes) (1958), она предназначалась для эл.-магн. колебаний субмиллиметрового и оптич. диапазонов. Впоследствии идеи этого варианта О. р. были перенесены в др. диапазоны эл.-магн. колебаний, а также на волновые поля иной природы. Ниже для определённости рассматриваются только О. р. для эл.-магн. колебаний.

В известном смысле О. р. можно рассматривать как модификацию экранированных объёмных резонаторов с частично убранными стенками. Спектр собств. колебаний идеального экранирова. резонатора с увеличением его объёма уплотняется ( $\Delta\omega/\omega \sim \sqrt{V/V_0}$ ) и при наличии даже малого поглощения превращается в сплошной, так что такая система фактически перестаёт быть резонансным устройством. Возникает естеств. потреб-

ность в разрежении спектра (в селекции мод). В О. р. разрежение осуществляется простейшим образом — увеличением радиц, потерь нежелательных мод, к-рые «высвечиваются» в окружающее пространство. Это прежде всего моды, группирующиеся в лучи, не задевающие отражателей. С др. стороны, подбором размеров и профилей отражателей удаётся спизать потери на излучение (дифракц. потери) полезных (рабочих) мод и сделать их высокодобротными. Для изобрят. уменьшения потерь может быть использовано отражение от границы диэлектрик — вакуум. В О. р., образованном диэлектрич. стержнем с прозрачностью  $\epsilon_d$ , размещённым между параллельными пластинами (рис. 1, а), колебания с малыми потерями представляют собой волновые пучки, полностью отражающиеся от

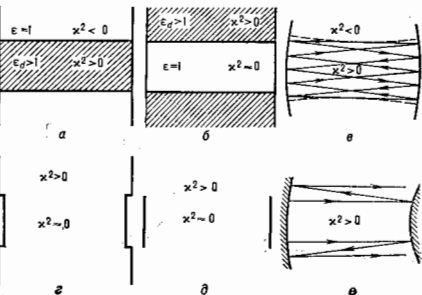


Рис. 1.

границы диэлектрик — вакуум. Поперечное к оси резонатора волновое число  $x$  этих мод в области  $\epsilon = 1$  является чисто мнимым, в области  $\epsilon_d > 1$  действительным. Для высокодобротных мод простр-во с  $\epsilon = 1$  предстает закритич. волновод («С. Волновод и Волновод диэлектрический»). Число таких колебаний увеличивается с ростом разности  $\epsilon_d - 1$ . В «инвертированной» системе (рис. 1, б) высокодобротные колебания сосредоточены в оптич. смысле менее плотной среде. Они излучают в более плотную среду, и это излучение не обращается в нуль даже для идеальных диэлектриков. Высокодобротными являются колебания в виде волновых пучков, скользящих вдоль границы диэлектриков. Поперечные волновые числа пучков близки к нулю внутри резонатора в среде с  $\epsilon = 1$  и действительны в среде с  $\epsilon_d > 1$ . Частоты колебаний близки к критич. частотам внутр. волновода.

Аналогичные условия отражения могут быть реализованы и без применения диэлектриков: полное отражение от закритич. волновода — планым уменьшением расстояния между отражателями (рис. 1, е), сильное отражение на частотах, близких к критич. частотам внутр. волновода, — внесением неоднородностей: скачкообразным изменением расстояния между отражателями (рис. 1, з) или ограничением размеров отражателей (рис. 1, д). Высокодобротные колебания будут иметь в этих случаях разный характер. В первом существует каустика, разграничивающая области докритич. и закритич. волноводов, в последнем — поле быстро (экспоненциально) убывает при удалении от каустики, во втором случае поле ограничивается областью сильного отражения. Оба способа повышения добротности применяются в О. р. Когда не требуется высокой добротности рабочей моды, часто используются резонаторы с постепенным увеличением расстояния между отражателями (рис. 1, е). Благодаря высоким значениям отношения запасённой к энергии потерь доб-



ротности совр. О. р. достигают рекордных цифр во всех достаточно КВ-диапазонах эл.-магн. волн: от  $10^8$  в диапазоне миллиметровых волн до  $10^6$  в оптическом.

Моды в О. р. суть волновые пучки, к-рые в квазиоптич. приближении можно представить как поля, распространяющиеся вдоль направления соответствующих геометрооптич. лучей и локализуемые в поперечном сечении с плавными (в масштабе  $\lambda$ ) отгибами. Поэтому конструирование и расчёты О. р. базируются сначала на рассмотрении характера поведения многократно отражающихся от зеркал геометрооптич. лучей и затем уже на установлении распределения полей, обычно с помощью *Леонтовича* параболического уравнения для комплексных амплитуд. В результате, как и для обычных экранов, резонаторов, решается задача о собств. ф-циях (модах) и собств. частотах, последние даже при наличии идеальных отражателей в принципе комплексны из-за неустойчивых потерь на излучение.

Различают устойчивые и неустойчивые моды О. р. (впрочем, иногда говорят просто об устойчивости О. р. как таковых). Устойчивой считается мода, «скелетные» геометрооптич. лучи к-рой локализованы внутри кустик, лежащей внутри О. р. На рис. 1 в показан «каркас» лучей для первой симметричной моды устойчивого двухзеркального О. р. со сферич. зеркалами с фокусными расстояниями  $F_1$  и  $F_2$ . Кустик, поверхность имеет характер гиперболоида вращения. Она существует, если

$$0 < \left(1 - \frac{L}{2F_1}\right) \left(1 - \frac{L}{2F_2}\right) < 1$$

( $L$  — длина резонатора; фокусные расстояния считаются положительными, если зеркала вогнутые). При невыполнении этого условия двухзеркальный О. р. является неустойчивым. Пример такого О. р. дан на рис. 1а; после многократных отражений лучи вырываются из него, что иногда используется для возбуждения О. р. или для вывода энергии из него (дифракц. вывод излучения — дифракц. связь). Аналогичным образом строится мода для разнообразных многозеркальных О. р. При этом принципиально различают два класса приборов: в первом, к-рому, в частности, относятся двухзеркальные комбинации (рис. 1, а — е), поле в продольных («лучевых») направлениях имеет характер стоячих волн с масштабом  $\lambda/2$ ; во втором классе приборов — т. п. кольцевых О. р., к к-рым относится, в частности, трёхзеркальный О. р. (рис. 2). — существуют две самостоят. бегущие (вращающиеся) навстречу друг другу моды одинаковых частот. Впрочем, иногда с помощью невзаимных устройств, преобразующих пучок, вырождение этих мод снимается вплоть до формирования одной бегущей волны.

Перпендикулярные вариации мод О. р., ограниченных кустиками, почти всегда имеют характер стоячих волн с сильно растянутой «длинной волной»:

$$L_{\perp} \approx \left(\frac{L_{\parallel}}{k}\right)^{1/2} \approx \left(\frac{\lambda L_{\parallel}}{2\pi}\right)^{1/2},$$

где  $L_{\parallel}$  — характерный продольный размер О. р. Спектр собств. частот О. р. зависит от числа продольных и поперечных вариаций поля, отличаемых продольными и поперечными индексами, и имеет разный характер для устойчивых и неустойчивых мод. Так, для устойчивых мод двухзеркального асимметрично-симметричного резонатора

$$\omega_{q,m,n} = \frac{c}{L} \left[ \pi q + (m + 2n + 1) \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{L}{2F_1}\right) \left(1 - \frac{L}{2F_2}\right)} \right],$$

где  $q$  (обычно  $\gg 1$ ),  $m$ ,  $n$  (целые числа) — продольный азимутальный и радиальный индексы соответственно.

Потери на излучение таких мод экспоненциально малы и носят характер туннельного «просачивания» поля от кустиков к краю зеркала. При отсутствии дифракции на краях зеркал собств. частоты двухзеркального неустойчивого О. р. с выпуклыми зеркалами определяются соотношением

$$\omega_{q,m,n} = \frac{c}{L} \left[ \pi q + i(m + 2n + 1) \operatorname{arccch} \sqrt{\left(1 - \frac{L}{2F_1}\right) \left(1 - \frac{L}{2F_2}\right)} \right],$$

к-рое показывает, что дифракц. потери быстро увеличиваются с ростом поперечных индексов. В общем случае потери на излучение в О. р. определяются безразмерным параметром Френеля  $N = a^2/\lambda L$ , определяющим число зон Френеля, укладываемыхся на апертуру зеркала diam.  $2a$  (см. Дифракция света).

Дифракция на краях зеркал играет определяющую роль в формировании колебаний, находящихся на границе перехода от устойчивых к неустойчивым, к к-рым относятся моды О. р. с плоскими зеркалами. Собств. частоты такого О. р. с круговыми зеркалами равны

$$\omega_{q,m,n} = \frac{c}{L} \left[ \pi q + \frac{v_{m,n}^*}{4\sqrt{N}} - \frac{0,33v_{m,n}^*}{4\sqrt{N}^{3/2}} + i \frac{0,33v_{m,n}^*}{4\sqrt{N}^{3/2}} \right],$$

где  $v_{m,n}$  — корень ф-ции Бесселя  $J_m(x)$ . При недостаточном большом коэф. отражения от зеркал и большом параметре Френеля моды с разными поперечными, но одинаковыми продольными индексами вырождаются и О. р. с плоскими зеркалами становится обычным интерферометром Фабри — Перо.

Возбуждение О. р. производится с помощью полупрозрачных зеркал, пластина, а также посредством щелей, отверстий и т. д. Устойчивые О. р. широко применяются в качестве фильтров, спектральных анализаторов и волномеров в диапазоне длин волн от оптических до сантиметровых. Они являются естествен. колебат. системами автогенераторов в этих диапазонах — лазеров (см. Оптический резонатор), мазеров, оротронов и т. д. В мощных лазерах и мазерах на циклотронном резонансе (гиротронах) часто используются неустойчивые О. р. с дифракц. выводом излучения. Кольцевые резонаторы применяются в лазерных гироскопах. С увеличением эффективности связи О. р. с внеш. линиями передачи селекция типов колебаний — превращение дифракц. потерь вработных мод над дифракц. потерями рабочих — уменьшается. Повышение её достигается, как правило, усложнением конструкции О. р. В О. р. различают селекцию поперечных мод, отличающихся друг от друга структурой поля на зеркалах, и селекцию продольных мод, имеющих идентичные поперечные структуры поля, но отличающихся числом полуволн, укладываемыхся между зеркалами. Селекция поперечных мод основывается на различии в их пространствах, структурах и достигается ограничением пучков поглощающими диафрагмами, в том числе т. п. мялки, с плавно увеличивающимся к краю коэф. поглощения, применением профильных зеркал, зеркал с постепенно изменяющимся коэф. отражения, ограничением угл. спектра пучков. Эфф. методом селекции поперечных типов колебаний оказывается применение дифракц. вывода, при этом приходится принимать меры для преобразования получаемого излучения в волдовые пучки, обладающие низким уровнем потерь при канализации, высокой направленностью, малым уровнем боковых лепестков. Методы селекции продольных мод основаны на применении диспергирующих элементов: интерферометров Фабри — Перо, призм, дифракц. решёток, связанных резонаторов и т. п.

Лит.: Вайнштейн Л. А., Электромагнитные волны, 2 изд., М., 1988; его же, Открытые резонаторы и открытые волноводы, М., 1966; Техника субмиллиметровых волн, М., 1989; Афанасьев Ю. А., Оптические резонаторы и проблема расходности лазерного излучения, М., 1979.

С. Н. Васов, М. А. Миллер.

**ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ** (ОБЭ) — безразмерный коэф., характеризующий эффективность биол. действия разл. *ионизирующих излучений*. Определяется как отношение дозы некоторого образцового излучения  $D_0$  к дозе данного излучения  $D_x$ :

$$ОБЭ = D_0/D_x.$$

За образцовое принимают рентг. излучение с определённым энергетич. спектром,  $D_0$  и  $D_x$  соответствуют одинаковому радиол. эффекту (напр., помутнение хрусталика глаза, число погибших клеток, число хромосомных aberrаций). ОБЭ зависит от дозы излучения, от его длительности при заданной дозе, от вида наблюдаемого эффекта и от линейной передачи энергии заряженных частиц (рис. 1 и 2). Данные по ОБЭ используются

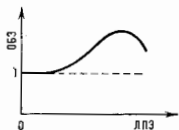


Рис. 1.

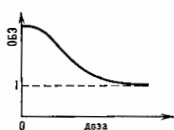


Рис. 2.

для установления т. н. коэф. качества излучения, к-рой переводит значение поглощённой дозы излучения в значение эквивалентной дозы.

Лит. см. при ст. Дозы излучения.

В. И. Ислюков.

**ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ.** При решении ряда задач кинематики движение точки (или тела) рассматривают одновременно по отношению к двум (или более) системам отсчёта, из к-рых одна, наз. основной, считается условно неподвижной, а другая, определённым образом движущаяся относительно основной, — подвижной системой отсчёта. Движение точки (или тела) по отношению к подвижной системе отсчёта наз. *О. д.* Скорость точки в *О. д.* наз. относит. скоростью  $v_{отп}$ , а ускорение — относит. ускорением  $w_{отп}$ . Движение всех точек подвижной системы относительно основной наз. в этом случае переносным движением, а скорость и ускорение той точки подвижной системы, в к-рой в данный момент времени находится движущаяся точка, — переносной скоростью  $v_{пер}$  и переносным ускорением  $w_{пер}$ . Наконец, движение точки (тела) по отношению к осн. системе отсчёта наз. сложным или абсолютным, а скорость и ускорение этого движения — абс. скоростью  $v_a$  и абс. ускорением  $w_a$ . Зависимость между названными величинами даётся в классич. механике равенствами

$$v_a = v_{отп} + v_{пер}, \quad w_a = w_{отп} + w_{пер} + w_{кор}, \quad (1)$$

где  $w_{кор}$  — *Кориолиса ускорение*. Разложение сложного движения на переносное и *О. д.* и применение для определения характеристик этого движения ф-л (1) позволяют существенно упростить кинематич. исследование.

В динамике *О. д.* наз. движение по отношению к инерциальной системе отсчёта, для к-рой законы механики Ньютона справедливы. Чтобы у-ния *О. д.* материальной точки сохранили тот же вид, что и в *инерциальной системе отсчёта*, надо к действующей на точку силе взаимодействия с др. телами  $F$  присоединить т. н. переносную силу инерции  $J_{пер} = -mv_{пер}$  и *Кориолиса силу*  $J_{кор} = -mv_{кор}$ , где  $m$  — масса точки. Тогда

$$m w_{отп} = F + J_{пер} + J_{кор}. \quad (2)$$

При *О. д.* системы материальных точек аналогичные у-ния составляются для всех точек системы. Этим у-ниями широко пользуются для изучения *О. д.* под действием сил различных механич. устройств (в частности, *гироскопов*), устанавливаемых на подвижных основаниях (кораблях, самолётах, ракетах), а также

для изучения движения тел по отношению к Земле в случаях, когда требуется учесть её суточное вращение.

Лит. см. при ст. *Кинематика* и *Динамика*. С. М. Тарг.

**ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ОТВЕРСТИЕ** — отношение диаметра действующего отверстия объектива к его фокусному расстоянию. Квадрат *О. о.* определяет освещённость в плоскости изображения и наз. геом. *светосилой* объектива.

**ОТНОСИТЕЛЬНОЕ РАВНОВЕСИЕ** — равновесие (покой) материальной точки (тела) по отношению к инерциальной системе отсчёта. Условие *О. р.* материальной точки состоит в том, что геом. сумма действующих на неё сил взаимодействия  $F$  с др. телами должна вместе с переносной силой инерции  $J_{пер} = -mv_{пер}$  (см. *Относительное движение*) дать ноль, т. е.  $\Sigma F + J_{пер} = 0$ . При равновесии тела на поверхности Земли одной из действующих на него сил будет сила тяжести  $P$ , являющаяся суммой силы притяжения Земли и переносной силы инерции  $J_{пер}$ , обусловленной суточным вращением Земли. Следовательно, сила  $J_{пер}$  входит в силу  $P$  и условие *О. р.* на Земле будет иметь тот же вид, что и в *инерциальной системе отсчёта*.

С. М. Тарг.

**ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ПРИНЦИП** (принцип относительности Эйнштейна) — утверждает, что все физ. явления (механич., оптич., эл.-магн. и любые другие) при одинаковых нач. условиях протекают одинаково во всех *инерциальных системах отсчёта*. Этот постулат был, но-видимому, впервые высказан А. Пуанкаре (H. Poincaré) в 1895. Вместе с постулатом о независимости скорости света от движения источника *О. п.* был положен А. Эйнштейном в основу построения *относительности теории*, приведшей к глубокому пересмотру понятий о пространстве и времени. *О. п.* содержит как предельный случай при малых по сравнению со скоростью света скоростях тел *Галилея принцип относительности*.

И. Ю. Кобзарев.

## ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ТЕОРИЯ

Содержание:

Введение	493
Группа Пуанкаре	494
Группа Лоренца	496
Аберрация света и видимая форма предметов в частной <i>О. т.</i>	497
Пространство скоростей	497
Векторы и тензоры в пространстве Минковского	498
Синхронные представления группы Лоренца	499
Структура пространства Минковского	499
Релятивистская механика	500
Экспериментальные основания частной <i>О. т.</i>	501

*О. т.* — теория, описывающая универс. пространственно-временные свойства физ. процессов. Поскольку эти свойства справедливы для всех известных в физике процессов и взаимодействий, об *О. т.* говорят просто как о физ. теории пространства-времени.

### Введение

Возникновение *О. т.* связано с неудачей обнаружить движение Земли относительно *эфира*. Х. А. Лоренц (H. A. Lorentz) и А. Пуанкаре (H. Poincaré) в 1904—05 смогли объяснить невозможность обнаружения этого движения, оставаясь в рамках представления о выделенности системы координат, в к-рой эфир покоится. Совр. точка зрения, основанная на принципе относительности Эйнштейна, была сформулирована А. Эйнштейном (A. Einstein) в 1905; при этом было исключено понятие механич. *эфира*. Большой вклад в развитие матем. аппарата теории внёс в 1908—10 Г. Минковский (H. Minkowski), к-рому принадлежит и интерпретация *О. т.* как геометрии четырёхмерного пространства-времени [1—4].

После появления теории тяготения Эйнштейна, построение к-рой было начато Эйнштейном в 1907 и завершено Х. Д. Гильбертом (H. D. Hilbert) и Эйнштейном в 1915 (первое обобщающее изложение теории было дано Эйнштейном в 1916), и её эксперим. подтверж-

дения стало ясно, что свойства пространства-времени в данной области зависят от действующих в ней гравитационных полей (см. *Тяготение*). В О. т. рассматривается частный случай — свойства пространства-времени в областях, где поля тяготения можно с желаемой точностью пренебречь; отсюда термин — ч а с т в а я, или с е д а л ь н а я, О. т. (последний термин возник в результате неудачного букв. перевода нем. слова *zweifel* — частный). Осн. понятие О. т. — с о б и т и е, под к-рым понимается нечто происходящее в данный момент времени в данной точке пространства (напр., вспышка света или совпадение стрелки прибора с делением шкалы). Реальные события имеют конечную протяженность в пространстве и времени, поэтому понятие события в О. т. является идеализацией. Опыт показывает, что применимость этой идеализации очень высока, вплоть до расстояний  $\sim 10^{16}$  см и времён  $\sim 10^{28}$  с.

Предполагается, что потен. совокупность событий образует четырёхмерный континуум. Каждое событие может быть охарактеризовано тройкой действ. чисел, определяющей его пространство, положение, и ещё одним действ. числом, определяющим момент времени, в к-рой это событие происходит. Предполагается, что пространство-время непрерывно, т. е. любой такой четвёрке чисел в нек-рой области числового пространства может быть поставлено в соответствие нек-рое событие и близким событиям отвечают близкие четвёрки чисел.

Области пространства-времени, где справедлива частная О. т., характеризуются тем, что в них могут быть введены локально инерциальные системы отсчёта (и. с. о.), в к-рых свободные от внеш. воздействий точечные тела и импульсы света движутся прямолинейно и равномерно. В реальной Вселенной гравитационные поля глобально не устранимы и присутствуют всюду. При наличии таких полей условия, требуемые для введения и. с. о., не выполняются, в частности ни точечные тела, ни импульсы света не движутся прямолинейно. Однако в тех областях, где эти поля однородны, можно, в силу *эквивалентности принципа*, ввести надлежащие свободно и без вращения системы отсчёта, в к-рых эти поля исчезают. Такие системы отсчёта и являются инерциальными. Любая система отсчёта, движущаяся равномерно и без вращения относительно данной и. с. о., также является инерциальной. В и. с. о. справедлива евклидова геометрия для пространства. Утверждение о равномерности движения предполагает определённый выбор синхронизации часов в разных точках и. с. о. (см. ниже).

Пример и. с. о. — система отсчёта, связанная с искусств. спутником Земли, стабилизированным относительно вращения с помощью гироскопа. В такой системе отсчёта не действуют ни гравитационные поля Земли, ни поля Солнца и Галактики в той степени, в какой эти поля однородны в масштабе спутника. Если рассматривать систему отсчёта, связанную с Землёй, то она уже не будет инерциальной как из-за вращения Земли, так и из-за новления в ней собств. гравитационного поля Земли. Однако на расстояниях, больших по сравнению с размерами области, где гравитационное поле Земли велико, но малых по сравнению с расстоянием до Солнца, система отсчёта, связанная с Землёй, можно считать инерциальной, т. к. Земля свободно падает в гравитационное поле Солнца.

Практически вопрос о том, можно ли данную систему отсчёта считать инерциальной, зависит от характера производимого опыта и требуемой точности. Так, при выполнении большинства оптич. опытов система, связанная с Землёй, может считаться инерциальной даже на поверхности Земли; то же относится к экспериментам в физике элементарных частиц. С др. стороны, камень, брошенный близ Земли, не движется прямолинейно и равномерно, и для него эта система отсчёта не инерциальна. Характерным параметром, опреде-

ляющим возможность введения и. с. о., является отношение  $\Delta\phi/c^2$ , где  $\Delta\phi$  — изменение гравитационного потенциала в рассматриваемой области. Напр., при измерении *Дольера эффекта*  $\Delta\phi/c^2$  в области измерения должно быть мало по сравнению с величиной  $v/c$ , где  $v$  — скорость источника,  $c$  — скорость света.

В области, где справедлива частная О. т., можно ввести и неинерт. системы отсчёта, в к-рых свойства пространства-времени нужно описывать с помощью аппарата общей теории относительности. В этом случае условие применимости частной О. т. имеет вид  $R_{\mu\nu\rho\sigma} = 0$ , где  $R_{\mu\nu\rho\sigma}$  — тензор Римана (*кривизмы тензор*), или более точно  $R_{\mu\nu\rho\sigma}/l_1 l_2 \ll 1$ , где  $l_1, l_2$  — характерные для данного опыта длины. При условии  $R_{\mu\nu\rho\sigma} = 0$  всегда можно ввести совокупность и. с. о. Если условие  $\Delta\phi/c^2 \ll 1$  при линейном законе изменения  $\Delta\phi$  характеризует неинерциальность, к-рая может быть устранима переходом в др. систему отсчёта, то мера отклонения  $R_{\mu\nu\rho\sigma}$  от нуля определяет, насколько пространство-время в данной области искривлено неустраивимым образом.

Обычно под частной О. т. подразумевают описание явлений с помощью и. с. о. После того как и. с. о. выбрана, необходимо задать метод определения в ней времён и координат событий. Т. к. в инерт. системах в частной О. т. справедлива евклидова геометрия, то для определения координат событий можно пользоваться декартовыми координатами  $x^1, x^2, x^3$ , или  $x, y, z$ , где  $x, y, z$  измеряются стандартным жёстким масштабом в ортогональной декартовой системе координат. Три координаты  $x, y, z$  объединяются в трёхмерный вектор  $r$  (или  $x$ ). Время  $t$  в данной точке  $r$  измеряют любым механизмом, совершающим периодич. движение, т. е. периодически возвращающимся в данную конфигурацию. Тогда число периодов  $n$  есть время  $t$ . Предполагается, что часы во всех точках пространства и во всех и. с. о. одинаковы. В совр. метрологии осн. единицы для измерения длины и времени выбираются с помощью оптич. явлений (число световых волн стандартного излучателя и число атомных колебаний стандартного атома для заданных переходов).

Для полного задания системы отсчёта необходимо определить метод сравнения времён событий, происходящих в разных местах. Опыт показывает, что в и. с. о. пространство изотропно; никаким опытом нельзя выделить физически предпочтительное направление. Естественно выбрать такую синхронизацию часов, находящаяся в разных точках  $A, B$ , чтобы не нарушалась эта изотропия. Стандартное определение в частной О. т. таково. Пусть в момент  $t_1$  из точки  $A$  в точку  $B$  носится сигнал (световой импульс, акустич. импульс в среде, находящейся в данной и. с. о., выстрел и т. д.). После прибытия сигнала в  $B$  идентичный сигнал посылается из  $B$  в  $A$ , где принимается в момент времени  $t_2$ . Тогда, по определению, время прибытия сигнала в  $B$  есть  $t = (t_1 + t_2)/2$ ; иначе говоря, предполагается, что времена распространения сигнала из  $A$  в  $B$  и из  $B$  в  $A$  одинаковы. Два события считаются одновременными (синхронными) в данной и. с. о., если времена  $t$  для них совпадают. Приведённые определения задают в данной и. с. о.  $L$  пространственно-временную координату  $x, y, z, t$ . Хотя в действительности область, охватываемая данной и. с. о.  $L$ , конечно, удобно допустить идеализиров. ситуацию и предполагать, что все перечисл. переменные меняются от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Теоретически можно допустить Вселенную, в к-рой массы и поля тяготения занимают малую область, а в осн. пространстве действует частная О. т., однако в реальной Вселенной эта возможность не реализуется.

#### Группа Пуанкаре

В области применимости частной О. т. пространство-время обладает высокой степенью симметрии: все физ. явления инвариантны относительно собств. преобразова-

ваний Пуанкаре, остающихся инвариантной метрику пространств-времени Минковского. Последняя определяется квадратом интервала  $s^2$ ,  $k$ -рый для двух событий с координатами  $x_1, y_1, z_1, t_1$  и  $x_2, y_2, z_2, t_2$  имеет вид:

$$s^2 = c^2(t_1 - t_2)^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - (z_1 - z_2)^2. \quad (1)$$

Пространство-время с такой метрикой наз. Минковского пространством-временем.

Обычно используется сокращённая запись: вводятся четырёхмерный вектор  $x$  с компонентами  $x^\mu$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ );  $x^0 = ct$ ,  $x^1 = x$ ,  $x^2 = y$ ,  $x^3 = z$ , метрический тензор  $\eta_{\mu\nu}$ ,  $k$ -рый диагонален и имеет компоненты  $\eta_{00} = 1$ ,  $\eta_{11} = \eta_{22} = \eta_{33} = -1$  [или  $\eta = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ ], и эйнштейновское правило суммирования, согласно  $k$ -рому по совпадающим верхнему и нижнему индексам всегда предполагается суммирование (по трём индексам суммирование проводится от 0 до 3). В такой записи

$$s^2 = \eta_{\mu\nu}(x_1 - x_2)^\mu(x_1 - x_2)^\nu. \quad (2)$$

Если рассматриваются преобразования Пуанкаре, при  $k$ -рых любое событие  $A$  с координатами  $x, y, z, t$  переходит в событие  $B$  с координатами  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}$ , то такие преобразования наз. активными.

Собств. преобразования Пуанкаре определяются как линейные преобразования вида

$$\bar{x}^\mu = B^\mu_\nu x^\nu + C^\mu, \quad (3)$$

непрерывно связанные с тождественным (единичным) преобразованием. Здесь  $B^\mu_\nu$  — матрица размерности  $4 \times 4$ ,  $C^\mu$  — произвольный 4-вектор. Из инвариантности  $s^2$  относительно преобразований (3) следует

$$\eta_{\mu\nu} B^\mu_\alpha B^\nu_\beta = \eta_{\alpha\beta} \quad (4)$$

и  $(\det |B^\mu_\nu|)^2 = 1$ . Из условия непрерывной связи с единичным преобразованием  $B^\mu_\nu = \delta^\mu_\nu$ , где  $\delta^\mu_\nu$  — Кронекера символ [ $\delta^\mu_\nu = \text{diag}(1, 1, 1, 1)$ ], следует, что

$$\det |B^\mu_\nu| = 1. \quad (5)$$

Инвариантность законов физики относительно преобразований Пуанкаре означает, что если возможна последовательность событий  $E$ :  $E_1(x_1^\mu)$ ,  $E_2(x_2^\mu)$ , ...,  $E_n(x_n^\mu)$ , ..., где  $x_n^\mu$  — 4-координаты  $n$ -го события, то возможна и последовательность  $\bar{E}$ :  $E_1(\bar{x}_1^\mu)$ ,  $E_2(\bar{x}_2^\mu)$ , ...,  $E_n(\bar{x}_n^\mu)$ , ..., где  $\bar{x}$  и  $x$  связаны преобразованием (3).

Др. словами, законы физики таковы: если последовательность  $E$  допустима и описывает нек-рый физ. процесс, то это же справедливо и для последовательности  $\bar{E}$ . Подчеркнём, что координаты  $x^\mu$  и  $\bar{x}^\mu$  измеряются в одной и той же системе отсчёта; последовательности  $E$  и  $\bar{E}$  — это две разные последовательности событий, связанные активными преобразованиями, но в то же время по своей внутр. структуре они неразличимы. Это, в частности, означает, что если два события  $E_n$  и  $\bar{E}_k$  совпадают, то совпадают и события  $\bar{E}_n$  и  $\bar{E}_k$ . Ситуация аналогична ситуации в геометрии Евклида, где группа активных преобразований пространства переводит тело из одного положения в другое, не изменяя его внутр. структуры.

Подвергнем теперь преобразованию Пуанкаре саму систему  $L$ ,  $k$ -рая перейдёт в систему  $L'$  с такими же, как в  $L$ , часами и масштабами. Т. к. измерение есть нек-рое событие, соответствующее фиксации совпадений отсчёта часов и делений на линейках с нек-рым событием в  $L$ , то условие сохранения совпадений означает, что

4-координаты  $(x'_i)^\mu$  события  $\bar{E}_i$  в  $L'$  и 4-координаты  $x_i^\mu$  события  $E_i$  в  $L$  совпадают:  $(x'_i)^\mu \equiv x_i^\mu$ .

Если ввести преобразование, связывающее координаты события  $(x')^\mu$  в  $L'$  и координаты того же события в  $L - x^\mu$  (такие преобразования наз. пассивными), то оно будет иметь вид

$$x^\mu = b^\mu_\nu (x')^\nu + c^\mu, \quad (6)$$

где свойства  $b^\mu_\nu$  и  $c^\mu$  такие же, как и для активного преобразования.

Преобразования Пуанкаре ( $P$ ) образуют группу. Как известно, условия того, что нек-рая совокупность элементов образует группу, следующие. а) Для любых двух элементов  $P_1$  и  $P_2$  определено произведение  $P_1 P_2$ . В случае преобразований Пуанкаре (активных) произведение определяется как результат последоват. выполнения преобразования  $P_2$  и затем  $P_1$ . Из условия  $\det |B^\mu_\nu| = 1$  следует разрешимость (3) относительно  $x^\mu$ .

б) Операция умножения ассоциативна:  $P_1(P_2 P_3) = (P_1 P_2)P_3$ . Для преобразований Пуанкаре ассоциативность очевидна, т. к. если  $P_3$  переводит объект  $A$  в  $B$ ,  $P_2 - B$  в  $C$  и  $P_1 - C$  в  $D$ , то, по определению,  $(P_2 P_3)$  переводит  $A$  в  $C$  и  $P_1 - C$  в  $D$ ; соответственно  $P_1(P_2 P_3) - A$  в  $D$ . Аналогично  $(P_1 P_2) - B$  в  $D$  и  $(P_1 P_2)P_3$  также переводит  $A$  в  $D$ . в) Существует единичная группа  $I$  такая, что  $IP = PI = P$ . Это выполняется, если  $B^\mu_\nu = \delta^\mu_\nu$ ,  $C^\mu = 0$ . г) Для любого  $P$  существует обратное преобразование  $P^{-1}$  такое, что  $PP^{-1} = P^{-1}P = I$ . Последнее очевидно, т. к. вследствие того, что  $\det |B^\mu_\nu| = 1$ , соотношение (3) может быть разрешено относительно  $x^\mu$ .

Группа Пуанкаре содержит в качестве подгруппы группу сдвигов во времени и в пространстве. Физически это означает, что в любой и. с. о. опыт, проведённый в др. время или в др. месте, даёт тот же результат (если установка изолирована от внеш. воздействий). Из группы Пуанкаре можно выделить подгруппу трёхмерных вращений и сдвигов:

$$(x')^i = A_i^k x^k + D^i, \quad (7)$$

где лат. буквами ( $i, k = 1, 2, 3$ ) обозначены пространств. индексы. Инвариантность относительно преобразований (7) означает, что в любой и. с. о. пространство однородно и изотропно.

Преобразования (3) содержат также преобразования, наз. бустами. При таких преобразованиях покоящийся в  $L$  точка ( $x' = \text{const}$ ) переходит в точку, движущуюся со скоростью  $v$ , а точка, движущаяся в  $L$  со скоростью  $v'$ , переходит в точку, движущуюся со скоростью  $v''$ , соответствующей релятивистскому закону сложения скоростей (см. ниже). В отличие от подгруппы (7), бусты подгруппы не образуют. Группа Пуанкаре содержит 10 независимых параметров. Коэф.  $A_i^k$  или  $B^\mu_\nu$  с учётом условия (4) содержит шесть независимых параметров, а четыре сдвига произвольны.

Инвариантность  $s^2$  относительно преобразований группы Пуанкаре означает, в частности, инвариантность ур-ния  $s^2 = 0$ . В свою очередь это означает инвариантность скорости света относительно всех преобразований, перечисленных выше (в действительности, согласно частной О. т., со скоростью света движется любая безмассовая частица). В частности, скорость света не изменяется при движении источника. (Событием  $E$  может служить испускание света движущимся источником.) Этот факт является одной из основных черт О. т.

Возможность реализации в  $L$  и  $L'$  последовательностей событий с одинаковыми координатами относитель-

но этих и. с. о. наз. приходим относительности Эйнштейна. Он означает, что законы природы должны иметь одинаковый вид во всех и. с. о. Для наблюдателей в  $L$  и  $L'$  соответственно процессы  $E$  и  $\bar{E}$  выглядят совершенно одинаково, это найд. наблюд. отражает утверждение о тождественности их внутр. структуры. Если не требовать выполнения условия непрерывного перехода от матриц  $A_{\nu}^{\mu}, B_{\nu}^{\mu}$  к единичной  $I$ , то наряду с нерешаемыми выше преобразованиями, приводящими к принципу относительности Эйнштейна, появляются также дискретные, или несобственные, преобразования  $t \rightarrow -t$  (обращение времени) и  $r \rightarrow -r$  (пространственная инверсия). Инвариантность относительно этих преобразований в природе нарушается слабым взаимодействием. Не соединяется непрерывно с  $I$  также преобразование  $x^0 \rightarrow -x^0$ . Инвариантность относительно такого преобразования имеет место, если дополнить его заменой всех частиц на античастицы. Это является общим следствием квантовой теории поля (теорема CPT).

### Группа Лоренца

Группой Лоренца (в математике её наз. собственной группой Лоренца) наз. подгруппа группы Пуанкаре, образуемая преобразованиями (в случае пассивных преобразований) вида

$$\begin{aligned}x^{\mu} &= b_{\nu}^{\mu}(x^{\nu}), \\(x^{\nu})' &= a_{\mu}^{\nu}x^{\mu},\end{aligned}\quad (8)$$

по-прежнему сохраняющая  $s^2$  и с матрицей  $b_{\nu}^{\mu}$ , непрерывно связанной с единичной матрицей  $I$ . Т. к. пространство Минковского, образуемое точками  $x^{\mu}$ , однородно, то выделенные начала координат в (8) не являются ограничением. Общий случай выбора преобразования (8) соответствует переходу к системе отсчёта, движущейся с пост. скоростью  $v$  и с осями, повернутыми произвольным образом. Очевидно, что он может быть сведён к след. последовательности преобразований: 1) такому повороту исходной системы осей, чтобы ось  $x^1$  совпала с направлением  $v$ ; 2) переходу к системе отсчёта с осями  $x', y', z'$ , параллельными осям  $x, y, z$  системы  $L$ , движущейся со скоростью  $v$ ; 3) произвольному повороту осей  $x', y', z'$ . Число параметров преобразования равно при этом 6; это совпадает с тем, что матрица  $b_{\nu}^{\mu}$  удовлетворяет условию  $b_{\alpha}^{\mu} a_{\nu}^{\alpha} \eta_{\mu\nu} = \eta_{\alpha\beta}$  ( $a_{\alpha}^{\mu}$  — матрица  $4 \times 4$ ,  $\det |a_{\alpha}^{\mu}| = 1$ ). Преобразования к параллельным осям, движущимся с произвольной скоростью  $v$ , являющиеся пассивным аналогом бустов, не образуют подгруппы Лоренца, во преобразования относительно фиксиров. направления движения образуют. Выберем в качестве направления движения ось  $x^1$ . В этом случае координаты  $x^2, x^3$  не преобразуются:  $(x^2)' = x^2, (x^3)' = x^3$ . Выберем в (1) в качестве точки 1 начало координат. Тогда условие инвариантности интервала будет иметь вид

$$s^2 = (x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2 = (s')^2$$

и  $s^2$  инвариантны относительно (8). В случае движения по оси  $x^1$  условие инвариантности сводится к требованию инвариантности выражения  $(x^0)^2 - (x^1)^2$  с очевидным решением:

$$x^1 = \frac{(x^1)' + \beta(x^0)'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x^0 = \frac{(x^0)' + \beta(x^1)'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (9)$$

где  $\beta = v/c$ , и соответственно обратным преобразованиям:

$$(x^1)' = \frac{x^1 - \beta x^0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (x^0)' = \frac{x^0 - \beta x^1}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (10)$$

Множитель  $1/\sqrt{1 - \beta^2}$  имеет стандартное обозначение  $\gamma$  ( $\gamma \geq 1$ ). С точки зрения инвариантности  $s^2$ ,  $\beta$  может быть произвольным параметром,  $-1 < \beta < 1$ . При  $|\beta| = 1$  возникает сингулярность, а затем преобразование становится мнимым, что является одним из выражений недолучимости в частной О. т. скоростей, больших скорости света.

Положим в (10)  $(x^1)' = 0$  (начало координат), имеем  $x^1 = (v/c)x^0 = 0$ , т. е. (т. к.  $x^0 = ct$ )  $v$  есть скорость движения  $L'$  относительно  $L$ .

Из ф-л (9) и (10) вытекают два осн. классич. следствия частной О. т. При измерении в  $L$  длины стержня  $l$ , покоящегося в  $L'$ , естественно считать его длиной в  $L$  разность координат концов, измеренных в одно и то же время в  $L$ . Тогда (пользуясь обозначениями  $x, y, z$  для координат) имеем для точек  $A, B$  стержня

$$x_A - x_B = (x'_A - x'_B)\sqrt{1 - \beta^2},$$

или

$$l = l_0\sqrt{1 - \beta^2} = l_0/\gamma, \quad (11)$$

где  $l_0 = x'_A - x'_B$  (по определению) — длина покоящегося в  $L$  стержня, наз. его собственной длиной  $l_0$ . Т. о., движущийся вдоль своей длины отрезок сокращается в  $\gamma$  раз; это сокращение наз. сокращением Лоренца — Фитцджеральда. Соответственно во столько же раз сокращаются все продольные (вдоль движения) размеры движущегося тела. Подчеркнём, что речь идёт именно об определённой процедуре измерений и вопрос о видимой форме тела в частной О. т. нуждается в отд. рассмотрении. Для равномерных прямолинейных движений эффект сокращения относителей; наблюдатель в  $L'$  измерит при аналогичной ситуации сокращение масштаба в  $L$ . Однако это несправедливо для непрямолинейного движения. Представим себе оземь большое число стержней, уложенных кольцом внутри обода диска  $2\pi R$ . Тогда при  $l_0 \ll R$  число стержней, к-рые могут быть уложены по ободу, равно  $2\pi R/l_0$ . Если же стержни быстро скользят вдоль обода, то сокращение Лоренца — Фитцджеральда приведёт к тому, что окажется возможным уложить  $(2\pi R/l_0)\gamma$  стержней. Т. о., сокращение Лоренца — Фитцджеральда есть нек-рое объёмное свойство геометрии пространства-времени Минковского (т. е. свойство пространства  $\{x^{\mu}\}$ , описываемое группой Пуанкаре).

Рассматривая часы, помещённые в  $L'$  в начале координат, получаем

$$t' = t\sqrt{1 - \beta^2}, \quad (12)$$

т. е. движущиеся часы с точки зрения наблюдателя в  $L$  отстают. Так же как и для длин, эффект симметричен: для наблюдателя в  $L'$  отстают часы в  $L$ . Симметрия связана с характером постановки опыта; один движущиеся часы сравниваются с покоящимися синхронизован. цепочкой часов в др. системе отсчёта. В случае, если часы движутся по замкнутой траектории, эффект становится абсолютным. Если часы движутся в течение времени  $T$  из  $A$  в  $B$ , а потом обратно из  $B$  в  $A$  с той же скоростью, то с той точностью, с к-рой можно игнорировать временем поворота и действием ускорения (а это всегда возможно, если  $T$  достаточно велико по сравнению с временем поворота), по часам наблюдателя в  $A$  пройдет  $2T$  единиц времени, а по двигающимся часам  $2T\sqrt{1 - \beta^2}$ . Этот эффект, часто называемый парадоксом близнецов, абсолютен. В действительности никакого парадокса нет, поскольку система отсчёта, связанная с часами, перестаёт быть инерциальной во время поворота.

Из инвариантности интервала следует, что в общем случае движущиеся часы, проходящие за время  $dt$  рас-

стояние  $dl$ , покажут величину интервала  $dt$ , поскольку в сопровождающей их системе отсчёта они покоятся. Отсюда следует

$$dt^2 = d\tau^2 + dl^2, \quad (13)$$

где  $dl$  — пройденный отрезок, или

$$d\tau = dt\sqrt{1 - \beta^2}. \quad (14)$$

Соответственно время, измеренное часами, движущимися по искривленной траектории  $AB$ , равно след. интегралу по траектории, по к-рой движутся часы  $B$ :

$$\tau = \int_A^B dt\sqrt{1 - \beta^2}. \quad (15)$$

Этот же результат можно записать в виде

$$\tau = \int_A^B ds,$$

где интеграл берётся по траектории часов. Из (15) видно, что движущиеся часы всегда отстают от неподвижных. Так же как и в рассмотренном выше частном случае, справедливость (15) требует, чтобы ускорения были достаточно малы и не оказывали действия на ход часов.

Из (9) следует закон сложения скоростей. Для частного случая, когда тело движется в  $L'$  параллельно оси  $x$  со скоростью  $V'$ , имеем для скорости тела в  $L$

$$V = \frac{V' + v}{1 + vV'/c^2}, \quad (16)$$

где  $v$  — скорость  $L'$  относительно  $L$ . Если рассматривать ф-лу (16) как активное преобразование, то она описывает буст точки, именной первоначально скорость  $V'$ . Из этой ф-лы сразу видна независимость скорости света от движения источника: при  $V' = c$  получаем  $V = c$ . Из неё также следует ф-ла Френеля частичного уклонения света источником. Если свет распространяется в среде с показателем преломления  $n$ , движущейся со скоростью  $v$ , то  $V' = cn$  и для скорости света в лаб. системе  $L$  имеем

$$c' = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right).$$

### Абберация света и видимая форма предметов в частной О. т.

Пусть система  $L'$  (с осями, параллельными осям системы  $L$ ) движется параллельно оси  $x$  системы  $L$  со скоростью  $v$  и пусть в  $L'$  движется импульс света под углом  $\theta'$  к оси  $x'$ . Без ограничения общности можно считать, что импульс движется в плоскости  $x'y'$  и в момент  $t' = 0$  находится в точке  $x' = y' = 0$ . Из преобразований Лоренца получаем  $x = (ct'\cos\theta' + vt')/\sqrt{1 - \beta^2}$ . Моменту времени  $t'$  соответствует в  $L$  время

$$t = (t' + (v/c)t'\cos\theta')/\sqrt{1 - \beta^2},$$

и за это время импульс в  $L$  пройдёт путь  $l = ct$ . Отсюда для угла луча (соответствующего рассматриваемому импульсу света) с осью  $x$  в  $L$  получаем

$$\cos\theta = \frac{x}{l} = \frac{\cos\theta' + v/c}{1 + (v/c)\cos\theta'}. \quad (17)$$

Т. о., движущийся наблюдатель видит объект в др. направлении, чем неподвижный наблюдатель.

Если объект наблюдается под малым телесным углом, то изображение предмета, видимое движущимся наблюдателем, сохранит свою форму, но оказывается повернутым; если наблюдатель в  $L$  видит покоящийся в  $L'$  предмет под углом  $\theta$ , то изображение, к-рое он получит на мгновенной фотографии, будет соответствовать изображению в  $L'$  на снимке под углом  $\theta'$  (в  $L'$  изображение, очевидно, не зависит от момента снимка). Действительно, пусть импульсы света  $1'$  и  $2'$  в  $L'$  дают изображение в  $L'$  в момент  $t'$ . Пусть  $S_1$  и  $S_2$  — их

положения в момент  $t'$  в  $L'$ . В системе  $L'$  им соответствует разное время  $t_1$  и  $t_2$ ,  $t_2 - t_1 = \Delta t' \neq 0$ . Квадрат интервала между  $S_1$  и  $S_2$  равен

$$s^2 = c^2(\Delta t')^2 - (l')^2,$$

где  $l'$  — трёхмерное расстояние между  $S_1$  и  $S_2$ , равное  $\sqrt{c^2(\Delta t')^2 + c^2(\Delta r')^2}$ ,  $r'$  — расстояние между лучами  $1'$  и  $2'$ . Т. о.,  $s^2 = -(\Delta r')^2$ . В системе  $L$   $t_1 = t_2$ , фронт волны перпендикулярен к направлению лучей  $1$  и  $2$  и  $s^2 = -r^2$ , где  $r$  — расстояние между лучами в  $L$ . Т. к.  $s$  — инвариант, то  $r^2 = (r')^2$ , что и доказывает сделанное выше утверждение. Более подробно вопрос о видимых изображениях рассмотрен В. Вайскопфом (V. Weisskopf) и В. Риндлером (W. Rindler) в 1977. Это явление не противоречит, разумеется, сокращению масштабов, описанному в предыдущем разделе, т. к. там речь шла о мгновенных измерениях, здесь же решающую роль играет запаздывание импульсов, идущих от разных точек тела.

### Пространство скоростей

Пространством скоростей в частной О. т. называется пространство, каждой точке к-рого соответствует частица, движущаяся с данной скоростью  $v$ , а квадрат расстояния  $dl_v^2$  для двух бесконечно близких точек  $P, Q$  равен квадрату их относит. скорости, измеренной по часам в  $P$  и  $Q$ . Первое утверждение предполагает введение искривленной системы отсчёта и в этом смысле координатно-зависимое, второе имеет абс. смысл. Удобно ввести след. параметризацию. Для колеблющихся скоростей, как следует из преобразований Лоренца, справедлив закон сложения скоростей (здесь и ниже будем полагать  $c = 1$ , что приводит к существу, упрощению ф-л):

$$v_{02} = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 v_2}, \quad (18)$$

где  $v_1$  — скорость точки 1 относительно начала отсчёта  $O$ ,  $v_2$  — скорость точки 2 относительно точки 1 и  $v_{02}$  — скорость точки 2 относительно  $O$ . Эта ф-ла была получена выше для движения частицы по оси  $x$ , но, очевидно, справедлива всегда, если движение происходит по одной прямой. Введём параметр  $\chi$  такой, что  $v = \text{th}\chi$ . Тогда (18) принимает вид

$$\text{th}\chi_{02} = \frac{\text{th}\chi_1 + \text{th}\chi_2}{1 + \text{th}\chi_1 \text{th}\chi_2} = \text{th}(\chi_1 + \chi_2), \quad (19)$$

т. е., в отличие от скорости, параметр  $\chi$  аддитивен:

$$\chi_{02} = \chi_1 + \chi_2. \quad (20)$$

При  $\chi \ll 1$   $v \approx \chi$ , откуда следует, что если в пространстве скоростей ввести в качестве радиальной координаты параметр  $\chi$ , то для двух точек, движущихся в одном направлении, квадрат расстояния в пространстве скоростей равен

$$dl_v^2 = dv^2 = d\chi^2.$$

Для точек  $P$  и  $Q$ , движущихся с равными по модулю скоростями, образующими угол  $d\varphi$ , расстояние между ними, если они движутся из одной точки, растёт как  $v d\varphi dt$  во времени покоящейся системы отсчёта. Т. к.  $d\chi$  связано с собств. временем  $d\tau$  для  $P, Q$  соотношением  $d\tau = d\chi/\sqrt{1 - v^2}$ , то

$$dl_v^2 = dv^2 = [v^2/(1 - v^2)]d\varphi^2 = (\text{sh}\chi)^2 d\varphi^2.$$

Очевидно, что относит. скорость не зависит от нач. условия (совпадения  $P$  и  $Q$ ).

В бесконечно малой окрестности точки  $P$  пространства скоростей действует закон параллелограмма скорости Ньютона. Поэтому  $dv^2 = dv_1^2 + dv_2^2$ , следовательно, в случае движения в заданной плоскости

$$dl_v^2 = d\chi^2 + (\text{sh}\chi)^2 d\varphi^2. \quad (21) \quad 497$$

Как известно, такая метрика есть метрика плоскости Лобачевского. Это — двумерное пространство с постоянной гауссовой кривизной  $K = -1$ .

Аналогично, трёхмерному случаю соответствует трёхмерное пространство Лобачевского. В пространстве Лобачевского, как во всяком пространстве с заданной метрикой, можно ввести параллельный перенос. Геометрические линии, образующие параллельным переносом, по определению, есть прямые в этом пространстве. Т. к. в любой его точке в малой окрестности действует ньютонов закон сложения скоростей, то в этой окрестности параллельный перенос означает сохранение направления скорости, а если переносится какой-то др. вектор, то он должен сохранять угол с направлением скорости. В частности, параллельному переносу из  $O$  в  $A$  ( $B$ ) координатных осей соответствует чисто лоренцевское преобразование (без вращения) в системе отсчёта, движущейся со скоростью  $v_1$  ( $v_2$ ) (рис. 1). Параллельный перенос вдоль геодезической  $AB$  даёт чисто лоренцевское преобразование от  $A$  к  $B$ . При этом из-за кривизны пространства система, полученная последовательными переходами  $OA, AB$ , довернута (на угол  $\alpha$ ) относительно системы, полученной переходом  $OB$ . Это отражает тот факт, что чисто лоренцевские преобразования не образуют группы. Аналогично можно убедиться, что они не коммутируют между собой.

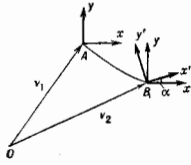


Рис. 1. Система  $x'$  получена из  $x$  параллельным переносом по  $AB$ .

Неевклидовость пространства скоростей непосредственно ответственна за явление, наз. томасовской прецессией [Д. Томас (L. Thomas), 1926]. Если физические реализованный вектор — ось гироскопа или спин частицы — связан с системой, движущейся ускоренно, а рассматриваемый вектор не испытывает воздействия к.-л. сил, то он переносится параллельно вдоль геодезика скорости, и т. к. пространство имеет кривизну, он прецессирует. Для вычисления этой прецессии удобно ввести сопутствующую систему координат, получающуюся параллельным переносом из  $O$  в  $P$ . При движении из  $P$  в  $P'$  вектор переносится параллельно и по отношению к сопутствующим осям оказывается повернутым на угол  $\delta\alpha = K S_{OPP'}$ , где  $K = -1$ ,  $S_{OPP'}$  — площадь  $OPP'$ , что даёт

$$\delta\alpha = -(\text{ch}x - 1)\delta\varphi. \quad (22)$$

В случае движения по окружности, когда  $x = \text{const}$ , для угл. скорости томасовской прецессии имеем

$$\alpha = -(\gamma - 1)\omega, \quad (23)$$

где  $\omega$  — угл. частота. В нерелятивистском пределе  $\alpha = -v^2\omega$ . Это выражение используется при расчёте тонкой структуры в атомной физике.

С помощью аппарата четырёхмерных векторов, описанного в след. разделе, легко получить для относительности скоростей  $v_{12}$  точек, движущихся со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ , образующими угол  $\theta$ , формулу

$$\frac{1}{\sqrt{1-v_{12}^2}} = \frac{1-v_1 v_2 \cos\theta}{\sqrt{1-v_1^2} \sqrt{1-v_2^2}}$$

или

$$\text{ch}x_{12} = \text{ch}x_1 \text{ch}x_2 - \text{sh}x_1 \text{sh}x_2 \cos\theta. \quad (24)$$

Ф-ла (24) является аналогом ф-лы косинусов сферы. тригонометрии для пространства Лобачевского.

**Векторы и тензоры в пространстве Минковского**

Для построения инвариантных и ковариантных выражений в частной О. т. используется тензорный ап-

парат в пространстве Минковского. Простейшей величиной, следующей за скаляром, является контравариантный четырёхмерный вектор. Таким является, в частности, 4-вектор  $x^\mu$  с компонентами  $x^0 = t, x^1 = x, x^2 = y, x^3 = z$ . Закон преобразования для него задан ф-лами (8). Произвольный 4-вектор  $B^\mu$ , преобразующийся по ф-лам (8), наз. контравариантным. Квадрат его длины  $B^2 \equiv \eta_{\mu\nu} B^\mu B^\nu$  является инвариантной величиной.

Матрицы  $a^\mu_\nu$  и  $b^\nu_\mu$  связаны соотношением

$$b^\nu_\mu = \eta^{\sigma\tau} a^\sigma_\mu a^\nu_\tau, \quad (25)$$

где

$$\eta_{\mu\nu} \eta^{\nu\sigma} = \delta^\sigma_\mu.$$

Наряду с контравариантными компонентами вектора  $B^\mu$  можно ввести ковариантные (часто говорят просто о ковариантных векторах)  $B_\mu = \eta_{\mu\nu} B^\nu$ . Для любых 4-векторов  $A, B$  можно определить скалярное произведение

$$(AB) = A_\mu B^\mu = A^\mu B_\mu, \quad (26)$$

инвариантное относительно преобразований Лоренца.

Произвольный тензор  $T^{(n)}_{(m)}$  ранга  $n + m$  с  $n$  контравариантными и  $m$  ковариантными индексами определяется законом преобразования:

$$T^{\mu_1 \dots \mu_n \nu_1 \dots \nu_m} = a^{\mu_1}_{\alpha_1} a^{\mu_2}_{\alpha_2} \dots a^{\mu_n}_{\alpha_n} b^{\nu_1}_{\beta_1} b^{\nu_2}_{\beta_2} \dots b^{\nu_m}_{\beta_m} T^{\alpha_1 \dots \alpha_n \beta_1 \dots \beta_m}. \quad (27)$$

Из определения  $\eta_{\mu\nu}$  следует, что он является инвариантным [преждевсич сам в себя при преобразовании (27)] тензором второго ранга (то же относится к  $\eta^{\mu\nu}$ ).

Из свойств преобразований Лоренца следует, что ранг тензора  $T^{(n)}_{(m)}$  может быть понижен на 2:  $T^{(n)}_{(m)} \rightarrow V^{(n-1)}_{(m-1)}$  свёртыванием (суммированием) по произвольной паре верхних и нижних индексов.

Примерами 4-векторов являются 4-импульс системы  $P^\mu$ , 4-потенциал эл.-магн. поля  $A_\mu$  и др. Четырёхмерные векторы классифицируются по их поведению относительно преобразований Лоренца: полярные векторы меняют знак пространственных компонент, а временная компонента не изменяется; аксиальные векторы ведут себя противоположным образом. Аналогичная классификация применяется и по отношению к величинам, инвариантным относительно преобразований Лоренца: они делятся на скаляры и псевдоскаляры.

Примером тензоров может служить тензор энергии-импульса  $T^{\mu\nu}$  и тензор эл.-магн. поля  $F^{\mu\nu}$ . Тензоры второго ранга  $S^{\mu\nu}$  могут быть симметричными и антисимметричными, для к-рых соответственно  $S^{\mu\nu} = \pm S^{\nu\mu}$ . Тензор  $T^{\mu\nu}$  является примером тензора первого типа,  $F^{\mu\nu}$  — второго.

Рассматривая кинематику точки, движущейся по произвольной траектории под действием внеш. сил, удобно ввести в качестве параметра точки  $P$  величину

$s = \int_A^P ds$ , где интеграл берётся по траектории частицы от произвольной точки  $A$ , тогда  $x^\mu = x^\mu(s)$ . В том случае первая производная по  $s$  даёт вектор четырёхмерной скорости

$$u^\mu = \frac{dx^\mu}{ds}. \quad (28)$$

Т. к.  $ds = dt\sqrt{1-v^2}$ , то

$$u^\mu = \frac{v^\mu}{\sqrt{1-v^2}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad u^0 = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}}. \quad (29)$$

Учитывая, что  $ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ , и деля эту выражение на  $ds^2$ , получаем

$$\frac{dx^\mu dx^\mu}{ds^2} = u^\mu u_\mu = 1. \quad (30)$$

Т. о., квадрат длины  $u^{\mu}$  равен 1. Инвариантное ускорение определяется как

$$w^{\mu} = \frac{du^{\mu}}{ds} = \frac{d^2x^{\mu}}{ds^2}. \quad (34)$$

Из (34) следует, что

$$w_{\mu}u^{\mu} + w^{\mu}u_{\mu} = 2w_{\mu}u^{\mu} = 0, \quad (32)$$

т. е. четырёхмерное ускорение ортогонально к 4-скорости.

Операции дифференцирования и интегрирования в частной О. т. могут быть представлены в ковариантном виде. Взятие частной производной по  $\partial/\partial x^{\mu}$  повышает ранг тензора на единицу с появлением ковариантного индекса  $\mu$  (простейший пример — вектор  $\partial\phi/\partial x^{\mu}$ , где  $\phi$  — скаляр).

В четырёхмерном мире Минковского возможны одномерные многообразия — линии, двумерные — поверхности, трёхмерные — гиперповерхности и четырёхмерные — объёмы. По всем им могут производиться операции интегрирования. Инвариантная форма интеграла по линии может иметь вид  $\int f(s)ds$  или  $\int B_{\mu}dx^{\mu}$ . Элементом двумерной поверхности является тензор  $dx^{\mu}dx^{\nu} = -dx^{\nu}dx^{\mu}$ , соответственно инвариантный интеграл возникает при интегрировании с антисимметричным тензором. Элемент гиперповерхности, построенный на 4-векторах  $dx(1)$ ,  $dx(2)$ ,  $dx(3)$  (где числа в скобках нумеруют 4-векторы), имеет вид детерминанта

$$\begin{vmatrix} dx^{\mu}(1) & dx^{\nu}(1) & dx^{\lambda}(1) \\ dx^{\mu}(2) & dx^{\nu}(2) & dx^{\lambda}(2) \\ dx^{\mu}(3) & dx^{\nu}(3) & dx^{\lambda}(3) \end{vmatrix}$$

и является тензором третьего ранга. В этом случае удобно ввести полностью антисимметричный тензор  $\epsilon_{0123}$  такой, что  $\epsilon_{0123} = 1$ , а при какой-либо перестановке индексов знак меняется. Этот тензор инвариантен при собственных преобразованиях Лоренца (но меняет знак при замене  $t \rightarrow -t$  или  $r \rightarrow -r$ ). С его помощью объёму гиперповерхности можно поставить в соответствие вектор  $ds_{\mu} = (1/3!) \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta} dx^{\nu}(1) dx^{\alpha}(2) dx^{\beta}(3)$ . Для случая, когда гиперповерхность — пространственная область с  $t = 0$ ,  $u$ ,  $ds_{\mu}$  отлична от нуля только компонента  $ds_0$ , а если  $dx(1)$ ,  $dx(2)$ ,  $dx(3)$  направлены по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , то

$$ds_0 = dx dy dz = dx^1 dx^2 dx^3,$$

т. е.  $ds_0$  равна элементу трёхмерного объёма. Элемент четырёхмерного объёма может быть представлен в виде  $d\Omega = (1/4!) \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta} dx^{\mu}(1) dx^{\nu}(2) dx^{\alpha}(3) dx^{\beta}(4)$  либо  $d\Omega = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3$ , т. е. он является четырёхмерным скаляром. Так же как в трёхмерном пространстве, в четырёхмерном пространстве существуют теоремы Гаусса и Стокса, напр.

$$\int \mathcal{B}^{\mu} ds_{\mu} = \int \frac{\partial \mathcal{B}^{\mu}}{\partial x^{\mu}} d\Omega.$$

#### Синигорные представления группы Лоренца

Из 4-вектора  $x^0$ ,  $x^1$ ,  $x^2$ ,  $x^3$  можно составить эрмитову матрицу

$$M = \begin{pmatrix} x^0 + x^1 & x^2 - ix^3 \\ x^2 + ix^3 & x^0 - x^1 \end{pmatrix}.$$

Детерминант этой матрицы представляется собой интервал  $(x^0)^2 - (x^1)^2 - (x^2)^2 - (x^3)^2$ . Если умножить  $M$  справа на произвольную унитарную матрицу (матрицу с детерминантом единица)  $K$ , а слева на эрмитово сопряжённую  $K$  матрицу  $K^+$  ( $M^+ = K^+ M K$ ), то очевидно, что это преобразование сохраняет как эрмитовость, так и детерминант матрицы  $M$ . Действительно,  $(M^+)^+ = (K^+ M K)^+ = K^+ M K = M^+$ ,  $\det M^+ = \det K^+ \det M \det K = \det M$ .

Т. о., если записать матрицу  $M'$  в виде

$$M' = \begin{pmatrix} (x^0)' + (x^1)' & (x^2)' - i(x^3)' \\ (x^2)' + i(x^3)' & (x^0)' - (x^1)' \end{pmatrix},$$

то получим  $s^2 = (s')^2$ , т. е. преобразование, принадлежащее группе Лоренца. Очевидно, что так построенные преобразования образуют группу. Можно показать, что каждому событию преобразования Лоренца соответствуют две и только две матрицы  $K$ , отличающиеся лишь знаком. Возможность найти для каждого преобразования Лоренца подходящую матрицу  $K$  следует, по существу, из того, что унитарная матрица зависит от столько же параметров, что и группа Лоренца, а неоднозначность в знаке матрицы  $K$  очевидна. Если ввести двухкомпонентную величину  $(\phi_{\pm})$ , преобразующуюся при преобразованиях Лоренца с помощью матрицы  $K$ , то получится новый вид представления группы Лоренца — с  $\pm$  и  $\nu$  в  $r$  и  $y$ . Он возникает естественно при построении Дирака уравнений, описывающего частицы со спином  $1/2$  в квантовой теории поля.

#### Структура пространства Минковского

Из ф-л (9) и (10) следует, что в частной О. т. время события не является абс. величиной: события, происходящие в разных точках, будут иметь разные времена в различных  $n$ . с. о., даже если они были одновременны в исходной системе отсчёта. Если

$$|x_A - x_B| > |t_A - t_B|, \quad (33)$$

то временной порядок событий  $A$ ,  $B$  может меняться при переходе от системы  $L$  к системе  $L'$ . В этом нет логич. противоречия, если скорость света является предельной для распространения сигналов и взаимодействий, т. к. тогда при выполнении условия (33) события  $A$  и  $B$  не могут быть причинно связаны. Напротив, если  $|x_A - x_B| \leq |t_A - t_B|$ , возможна причинная связь между  $A$  и  $B$ , но в этом случае порядок событий не меняется. (Однако если бы существовали частицы, движущиеся со скоростью, большей скорости света, — т. н. тахионы, то порядок причинно связанных событий мог бы быть разным в разных системах отсчёта. Это привело бы к серьёзным затруднениям с причинностью, т. к. наблюдатель в  $L'$  мог бы «уничтожить» событие  $A$ , к-рое в  $L$  порождает событие  $B$ , и причинная связь нарушилась бы. Попытки переинтерпретировать реакцию тахионов так, чтобы она стала непротиворечивой, не привели к успеху.)

Невозможность движения сигналов со скоростью, большей скорости света, не означает, что в частной О. т. вообще невозможны движения со сверхсветовой скоростью. Такие движения могут быть реализованы, напр., как движение «зайчика» от проектора, но в этом случае взаимодействие и причинная связь между разными точками траектории «зайчика» отсутствуют.

Инвариантная запись (33), справедливая в любой системе отсчёта, имеет вид  $s_{AB}^2 < 0$ . Такие интервалы наз. пространственными интервалами. В подходящей системе отсчёта соответствующий им 4-вектор  $AB$  может быть представлен в виде  $(0, r)$ . Условие  $s_{AB}^2 > 0$  определяет временные интервалы; соответствующий вектор может быть представлен в виде  $(t, 0)$ , и время  $t$  — это время, отсчитанное часами, движущимися по прямой  $AB$ . Ур-ние  $s^2 = 0$  соответствует прямой, являющейся траекторией светового луча или любой безмассовой частицы. Относительно любой точки  $O$  трёхмерное многообразие, наз. световым конусом или световой гиперповерхностью, на к-рой лежат все световые лучи, проходящие через  $O$ , разбивает пространство на две области:

$$\delta s_{\Delta}^2 \geq 0, \quad (34, a)$$

$$\delta s_{\Delta}^2 < 0. \quad (34, b) \quad 499$$



Если принять  $O$  за начало отсчёта, то в силу того, что совбств. преобразования Лоренца не меняют направления времени внутри светового конуса и на нём самом (34а), световой конус и заключённый внутри него объём можно разбить на части, соответствующие  $t > 0$  и  $t < 0$ , наа. верхней и нижней плоскми. Часть  $t > 0$ ,  $s_{0A}^2 \geq 0$ , соответствует событиям, на к-рые  $O$  может оказать причинное воздействие, или точкам, в к-рые может прийти сигнал из  $O$ ; это абс. будущее для  $O$ . Соответственно, совбств. всех событий, к-рые  $O$  может увидеть, или тех, к-рые могут оказать на неё причинное действие. Т. о., эта пола — абс. прошлое для  $O$ . Все траектории тел и лучей, приходящих из  $O$ , должны принадлежать нижней поле  $t < 0$ ,  $s_{0A}^2 \geq 0$ . Соответственно, все луча света и траектории тел, выходящих из  $O$ , принадлежат верхней поле и образуют абс. будущее для  $O$ .

Совкупность точек, связанных с  $O$  векторами  $(0, x, y, z)$  в системе отсчёта  $L$ , где точки по оси времени имеют вид  $(t, 0)$ , т. е. в системе, где ось времени проходит через  $O$ , очевидно, соответствует гиперповерхности, ортогональной к оси времени в метрике Минковского. Она состоит из событий, одновременных с  $O$  и образующих трёхмерное евклидово пространство. Такое пространство можно построить для любой точки на оси времени. Телам, покоящимся в этом пространстве, отвечают прямые мировые линии, параллельные оси времени.

Траектории любого тела, движущегося прямолинейно и равномерно в системе  $L$  и проходящего через  $O$  при  $t = 0$ , можно принять за временную ось системы отсчёта  $L'$ , связанной с  $L$  преобразованием Лоренца. Единичный вектор  $e_t$ , направленный по оси времени, всегда удовлетворяет инвариантному условию

$$\gamma_{\mu\nu} e_t^\mu e_t^\nu = 1. \quad (35)$$

Для оси  $t$  он имеет вид  $(1, 0, 0, 0)$ , а произвольный вектор, направленный по этой оси, есть  $te_t = (t, 0, 0, 0)$ . Для оси  $t'$  единичный вектор  $e_{t'}$  равен  $u^\mu$  с компонентами  $(\gamma, \gamma v)$ , соответственно, произвольный вектор, направленный по  $t'$ , имеет вид  $t'u = (t'\gamma, t'\gamma v)$ . Совокупность всех векторов, ортогональных оси  $t'$  в заданной точке, образует пространство системы  $L'$ , и события, лежащие в нём, одновременны в  $L'$ . Если в данной точке  $t'$  в этом пространстве построить оси  $x', y', z'$ , то они образуют полный набор координат в  $L'$ . Ось  $x'$  можно поместить в плоскость  $t'u$  (рис. 2), тогда единичный вектор, направленный по  $x'$ , будет иметь вид  $e_{x'} = (\gamma v, \gamma, 0, 0)$ ; в метрике Минковского он ортогонален  $e_{t'}$ .

Отсюда сразу вытекают эффекты изменения интервалов времени и пространства при переходе от  $L$  к  $L'$ . Промежуток времени  $\Delta t'$  в  $L'$  имеет временную компоненту в  $L$ , равную временной компоненте вектора  $\Delta t' e_{t'}$ ,

что даёт  $\gamma \Delta t' = \Delta t$  или  $\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - v^2}$ .

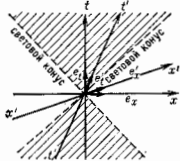


Рис. 2.

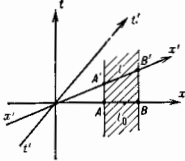


Рис. 3.

Соответственно, чисто пространственный отрезок  $AB$  длины  $l_0$  в  $L$  описывает в мире Минковского полосу, показанную на рис. 3; точки пересечения её границ с осью  $x'$  одновременны с точки зрения  $L'$  и, следовательно, определяют длину  $l$  отрезка  $AB$  в движущейся сис-

теме. Но  $l_0$  — это компонента вектора  $le'_{x'}$  по оси  $x$ , т. е.  $l_0 = \gamma l$  или  $l = l_0 \sqrt{1 - v^2}$ .

### Релятивистская механика

Для всех известных в частной О. т. классич. полей и частиц ур-ния движения могут быть получены из условия равенства нулю вариации действия:

$$\delta S = 0. \quad (36)$$

Величина  $S$  является четырёхмерным скаляром и может быть представлена в виде

$$S = \int d^4x L, \quad (37)$$

где  $L$  — плотность ф-ции Лагранжа (лагранжиан).

Для свободной материальной точки массы  $m$

$$S = -m \int ds = -m \int dt \sqrt{1 - v^2}. \quad (38)$$

Условие экстремума даёт

$$m \frac{dv^\mu}{ds} = 0. \quad (39)$$

Величина  $mdv^\mu/ds$  наз. 4-импульсом частицы.

Релятивистская инвариантность требует инвариантности действия для замкнутой системы относительно группы Пуанкаре. Инвариантность относительно подгруппы сдвигов приводит, в силу теоремы Нётер, к четырём законам сохранения:

$$\frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^\nu} = 0; \quad (40)$$

конкретный вид тензора  $T^{\mu\nu}$  определяется видом  $L$ . Легко показать, что  $T^{\mu\nu}$  всегда может быть приведён к симметричному виду. Из (40) следует существование четырёх сохраняющихся величин:

$$P^\mu = \int T^{\mu\nu} ds_\nu, \quad (41)$$

где интеграл берётся по трёхмерной гиперповерхности. Величины  $P^\mu$  образуют 4-импульс; компонента  $P^0$  — энергия системы,  $P^i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — компоненты её импульса. При интегрировании в (41) можно взять любую гиперповерхность или даже искривлённую пространственноподобную гиперповерхность, делящую мир Минковского на две части. Выбирая в качестве гиперповерхности гиперповерхность  $x^0 = \text{const}$ , получаем

$$ds_\nu = d^3x_\nu = dV$$

и

$$P^i = \int T^{i0} dV. \quad (42)$$

Вектор  $P^\mu$  времениподобен, поэтому всегда можно систему отсчёта, в к-рой определено интегрирование в (42), выбрать так, что  $P^i = 0$ . Эту систему называют с и с т е м о й покоя для рассматриваемого тела. В ней, по определению, 4-скорость тела равна  $(1, 0)$ . Введём массу тела, определив её в системе покоя как

$$\int T^{00} dV = m. \quad (43)$$

Отсюда следует, что в системе покоя

$$P^\mu = m u^\mu. \quad (44)$$

В силу релятивистской инвариантности это справедливо в любой системе отсчёта, если массу считать скаляром. Переходя в систему отсчёта, движущуюся со скоростью  $v$ , получаем

$$\mathcal{E} = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2}}, \quad \mathbf{P} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2}}. \quad (45)$$

т. е.

$$\mathbf{P} = \mathcal{E} \mathbf{v}. \quad (46)$$

Это соотношение справедливо и для безмассовых частиц, для к-рых  $v$  — единичный вектор. Случай  $m = 0$  получают предельным переходом. В системе единиц с

$c \neq 1$  ф-лы (45), (46) принимают вид:

$$\epsilon = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \quad P = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \quad P = \frac{d\epsilon}{c dt}. \quad (47)$$

Многие авторы, пытаясь сохранить ньютоново соотношение между импульсом и энергией ( $P = mv$ ), наз. величину  $\epsilon/c^2$  полной массой, релятивистской массой или просто массой и обозначают её  $m(v)$ ,  $m_r$  или  $m$ , а обычную массу, к-рая в этой статье обозначается  $m$ , наз. массой покоя (обозначают  $m_0$ ). Т. о. в их обозначениях  $m \equiv m_r, P \equiv m(v) = m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$ . Введение  $m(v)$ , однако, излишне, т. к. приводит к необходимости говорить о двух законах сохранения: энергии и полной массы, тогда как второй из них есть просто закон сохранения энергии, поделённой на  $c^2$ . Кроме того, ф-лы (47) неприменимы к безмассовым частицам.

Для материальной точки состояние движения однозначно определяется вектором  $u^i$  и 4-импульс (введённый описанным выше способом) равен  $mdu^i/ds$ . Если  $n$  первоначально изолированных друг от друга тел (систем) вступают в нек-рой области пространства-времени во взаимодействие, после чего возникают  $n'$  новых тел, то, поскольку до взаимодействия полный 4-импульс  $P = \sum_n P_{in}$ , а после взаимодействия  $P = \sum_{n'} P_{out}$ , где  $P_{in}$  и  $P_{out}$  обозначают начальные (входящие) и конечные (выходящие) частицы, и поскольку полный импульс сохраняется всегда,

$$\sum_n P_{in} = \sum_{n'} P_{out}. \quad (48)$$

В частности, для энергии имеем

$$\sum_n \epsilon(r)_{in} = \sum_{n'} \epsilon(f)_{out}, \quad (49)$$

где  $r$  и  $f$  измеряют входящие и выходящие частицы.

В отличие от энергии сумма масс не сохраняется, но полная масса замкнутой системы, разумеется, сохраняется в любом процессе. Напр., в физике элементарных частиц хорошо известен процесс распада  $\mu^0 \rightarrow 2\gamma$ . Нач. сумма масс есть просто  $m_{\mu^0}$ , а конечная равна нулю. Если обозначить  $P_{\mu^0}$  4-импульс  $\mu^0$ , а  $k_1, k_2$  — 4-импульсы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , то  $m_{\mu^0}^2 = (k_1 + k_2)^2$ . В системе центра инерции двух  $\gamma$ :

$P_{\mu^0} = (m_{\mu^0}, 0)$ ,  $k_1 = (\omega, \mathbf{k})$ ,  $k_2 = (\omega, -\mathbf{k})$ ,  $|\mathbf{k}| = \omega$ , окончательно  $m_{\mu^0}^2 = 4\omega^2$ ,  $\omega = m_{\mu^0}c/2$ . Из (48) следует, что если покоящемуся телу сообщают энергию  $\Delta\epsilon$ , то его масса возрастает на ту же величину,  $\Delta m = \Delta\epsilon/c^2$  (предполагается, что сообщаемый телу импульс равен нулю), и, наоборот, если тело теряет энергию  $\Delta\epsilon$ , оставаясь в покое, то его масса уменьшается на  $\Delta m = \Delta\epsilon/c^2$ .

В релятивистском пределе энергия  $\epsilon$  в (49) может быть записана в виде  $m + mv^2/2$  и закон сохранения энергии принимает вид

$$\sum_n \left( m_r + \frac{m_r v_r^2}{2} \right)_{in} = \sum_{n'} \left( m_f + \frac{m_f v_f^2}{2} \right)_{out}. \quad (50)$$

Напр., в распаде урана его масса покоя больше сумм масс покоя осколков; разность масс выделяется в виде их кинетич. энергий.

Из (39) следует, что для любого тела

$$P^2 = P_0 P^a = m^2. \quad (51)$$

Использование 4-импульса существенно упрощает решение задач с релятивистской кинематикой. Так, при распаде частицы с массой  $m_0$  на частицы с массами  $m_1, m_2$  получаем  $P_0 = P_1 + P_2$  или

$$P_0^2 - P_1^2 = P_2^2. \quad (52)$$

Возводя в квадрат (52), получаем

$$m_0^2 = m_1^2 + m_2^2 - 2(P_0 P_1).$$

В системе покоя частицы с массой  $m_0$  имеем  $(P_0 P_1) = = m_0 \epsilon_1$ , откуда  $\epsilon_1 = (m_1^2 + m_2^2 - m_0^2)/2m_0$ , и аналогично для  $\epsilon_2$ .

Для системы, находящейся во внеш. поле, 4-импульс не сохраняется. Для точечной частицы массы  $m$  закои его изменения можно представить в виде

$$m \frac{d u^i}{ds} = f^i, \quad (53)$$

где  $f^i$  — четырёхмерная внеш. сила. В электродинамике  $f^i = e F^{i\nu} u_\nu$  (сила Лоренца) и у-рние движения для частицы в поле имеет вид

$$m \frac{d u^i}{ds} = e F^{i\nu} u_\nu \quad (54)$$

( $e$  — электр. заряд частицы).

### Экспериментальные основания частной О. т.

Первоначальной эксперим. основой частной О. т. был ряд оптич. экспериментов, установивших отсутствие эффектов, связанных с движением Земли относительно галактич. эфира в порядках  $v/c$  и  $(v/c)^2$  (последнее — в опыте Майкельсона — Морли в 1887; см. Майкельсона *оптм*). Именно основываясь на этих опытах, А. Пуанкаре в 1895 высказал гипотезу, что постулат относительности точен во всех порядках по  $v/c$ . К 1905, когда Лоренц, Пуанкаре и Эйнштейн дали свои формулировки частной О. т., отсутствие эффектов в порядке  $v/c$  нашло дополнит. подтверждение в ряде опытов, по отсутствию эффектов в порядке  $(v/c)^2$  подтверждалось только опытом Майкельсона — Морли.

Постулат независимости скорости света от движения источника подтверждения на опыте не имел; он был выдвинут Эйнштейном как следствие справедливости электродинамики Лоренца в системе эфира и принципа относительности, исходя на к-рогэ этот постулат переносится на любые и. с. о.

Опыты Майкельсона — Морли неоднократно повторялись в 20-е гг. и независимо давали отрицат. результат. С появлением мазеров возникла возможность проверки отсутствия эффектов в порядке  $v/c$  в распространении света [Седерхольм (Х. Р. Седерхольм) и др., 1964]. Достигнутая точность порядка  $10^{-3}$ .

Независимость скорости света от движения источника неоднократно проверялась, наиб. точно — в работе Т. Альвегера (Т. Alväger) с сотрудниками (1964). В этом опыте измерялась скорость фотонов от распада  $\mu^0$ -мезонов с энергией ок. 1 ГэВ, т. е. движущихся со скоростью, практически равной  $c$ . При этом скорость движущихся вперёд  $\gamma$ -квантов совпадала со скоростью света с точностью порядка  $10^{-4}$ .

В 1986 проверялся ф-ла релятивистского эффекта Доплера:

$$\epsilon = \epsilon_0(1 + \beta \cos \theta). \quad (55)$$

Достигнутая точность для совпадения отношения  $\epsilon/\epsilon_0$  с теоретической предсказанной величиной [ф-ла (55)] составляет 1,00004(27), т. е.  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ . В принципе точность опыта может быть доведена до  $10^{-7}$ .

Ставились опыты по проверке отд. следствий частной О. т. Так, эффект замедления времени был проверен С. Росси (S. Rossi) с сотрудниками (1942) [III, 3] вплоть до  $\gamma \sim 10$ . Полученный результат, включая зависимость времени жизни от  $\gamma$ , согласуется с предсказаниями О. т.

В ядерной физике проверялось соотношение между дефектом массы и выделяющейся в реакции энергией. В особо прецизионных опытах Н. Смит (N. Smith, 1939) [III, 1] показал, что выделяющаяся энергия соответствует дефекту массы с точностью  $\sim 0,01$ .

В совр. технике широко применяются такие устройства, как электродно-лучевые трубки, электронные микроскопы и др., в к-рых достигаются  $\gamma \geq 1$ . Для расчёта таких устройств применяются ф-лы релятивистской механики, и в этом смысле частная О. т. является такой же основой инженерных расчётов, как механика Ньютона — основой для расчётов кораблей, самолётов, мо-

стов и др. «релятивистских» сооружений. Наибольшие у достигаются в совр. ускорителях заряд. частиц: для протонов  $\gamma \sim 10^4$ , для электронов  $\gamma \sim 10^5$ . При этом наглядно демонстрируется тот факт, что скорость света является предельной для всех частиц: после того как  $\gamma$  становится больше 10, энергия частиц растет, а скорость не меняется, становясь практически равной скорости света.

Одним из наиб. ярких релятивистских эффектов, наблюдаемых на электронных циклич. ускорителях больших энергий (синхротронах), является релятивистский рост частоты *синхротронного излучения*; релятивистские эффекты приводит к тому, что частота синхротронного излучения имеет рекаж максимум при  $\omega = \gamma^2 \omega_0$ , где  $\omega_0$  — угл. частота движения электронов. Этот эффект хорошо наблюдается. Релятивистское замедление времени лежит в основе технологии получения вторичных пучков нестабильных частиц:  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $\Sigma^\pm$ ,  $\Lambda^0$  и др. Напр., в состоянии покоя  $\Sigma^-$  и  $\Sigma^+$ -гипероны живут соответственно  $0,8 \cdot 10^{-10}$  с и  $1,5 \cdot 10^{-10}$  с, но уже при  $\gamma \sim 10$  они, двигаясь со скоростью  $v = c$ , имеют длины распада 24 см и 45 см, что делает возможным формирование  $\Sigma^-$ -пучков. Ещё сильнее проявляется замедление времени в пучках  $\pi^\pm$ -мезонов, где достигается  $\gamma \sim 10^8$  и выше.

Точность релятивистской кинематики можно оценить по точности определения масс нестабильных частиц ( $\sim 10^{-4} - 10^{-6}$ ). Здесь производится проверка кинематики на самосогласованности, поэтому приведенная ошибка в определении масс может рассматриваться как оценка точности релятивистской кинематики.

Геометрия Минковского лежит в основе совр. теорий взаимодействия элементарных частиц — *квантовой электродинамики* (КЭД), *квантовой хромодинамики* и теории *гравитационного взаимодействия*, объединяющей КЭД и теорию слабого взаимодействия. Из перечисленных теорий лучше всего на опыте проверена КЭД, относительно к-рой из прямых опытов известно, что она справедлива вплоть до расстояний  $10^{-16}$  см и соответственно времени  $\sim 10^{-26}$  с. Вплоть до таких расстояний и времён действует, т. о., геометрия Минковского.

Лит.: 1) *Применяемая физика*. 1) *Квантовая электродинамика*. Г. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, Г. Минковский. Сб. работ, М.—Л., 1935; 2) Лоренц Г. А., Старые и новые проблемы физики. (Сб. пер.), М., 1970; 3) Пуанкаре А., Набл. труды, т. 3, М., 1974; 4) Эйнштейн А., Собр. научн. трудов, т. 1—2, М., 1965—66. II. Монографии: 1) В о р н М., Эйнштейновская теория относительности, пер. с англ., 2 изд., М., 1972; 2) В а в и л о в С. И., Экспериментальные основания теории относительности, М.—Л., 1926; 3) В а в с и о н Ф. В., Физика в двадцатом столетии, пер. с англ., М., 1977; 4) Л а н д а У. Л. Д., Л и ф ш и ц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; 5) М о л о т о в А. А., Основы теории относительности, М., 1982; 6) R i n d l e r W., Essential relativity, 2 ed., N. Y., 1977; 7) П а у л и В., Теория относительности, пер. с нем., 2 изд., М., 1983; III. Периодические издания: 1) S m i t h N. M., The energies released in the reactions  $L_i^+ (p, \alpha) He^4$  and  $L_i^+ (d, \alpha) He^4$  and masses of the light atoms, «Phys. Rev.», 1939, v. 56, p. 548; 2) R o s e В. и др., Fairly measurement of the positron lifetime, «Phys. Rev.», 1942, v. 61, p. 675; 3) Review of particle properties. Particle data group, «Rev. Mod. Phys.», 1984, v. 56, № 2, pt. 2; 4) A l v a g e s T. и др., Test of a second postulate of special relativity in the U region, «Phys. Lett.», 1964, v. 12, p. 260; 5) S e d a r h o l m J. P. и др., New experimental test of special relativity, «Phys. Rev. Lett.», 1958, v. 1, p. 342; 6) M a c A r t h u r D. W. и др., Test of a special-relativistic Doppler formula at  $\beta = 0,84$ , «Phys. Rev. Lett.», 1986, v. 57, p. 282.

И. Ю. Кобаев. **ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ** — величина, характеризующая способность поверхности тела или грани раздела двух сред отражать падающий на неё поток эл.-магн. излучения или упругих волн. Количеств. характеристика О. с. — коэф. отражения. О. с. зависит от угла падения и поляризации падающего эл.-магн. излучения. Зависимость О. с. поверхности от длины волны излучения в области видимого света воспринимается глазом человека как окраска отражающей поверхности. См. *Отражение света*.

**ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ПРИЗМЫ** — оптич. детали с плоскими отражающими и преломляющими поверхностями, образующими между собой двугранные углы; один из видов *призм* оптич. систем. Обычно О. п. изготов-

ляют из такого стекла, чтобы они не обладали дисперсией и двойным лучепреломлением (в отличие от спектральных и поляризац. призм). В О. п. угол падения луча на первую грань равен углу преломления на последней грани; при этом направление луча, прошедшего через О. п., может меняться. В большинстве случаев отражение луча от грани призм является *полным внутренним отражением*, а если угол  $\epsilon_m$  падения луча на отражающую грань (рис. 1) меньше предельного, то её покрывают зеркально отражающим слоем (серебро, алюминий). Обычно для О. п. используют *оптическое стекло* марок К8 и БК10, для к-рых  $\epsilon_m = 46^\circ 46'$  и  $39^\circ 36'$  (для показателя преломления  $n$ , соответствующего длине  $D$ ,  $\lambda = 587,5$  нм). Если луч падает на преломляющую грань не перпендикулярно, то при отражении от следующей грани надо учитывать преломление. Надо угол падения  $\epsilon_1$  на входную грань ограничить; из рис. 1 следует, что  $\epsilon_1' = \theta - \epsilon_m$  ( $\theta$  — преломляющий угол О. п.). Для того чтобы О. п. не нарушала гомоцентричности падающего сходящегося или расходящегося луча, необходимо соблюдение условия:  $\sin \epsilon_1 = n \sin(\theta - \epsilon_m)$ . В этом случае для прямоугольной равнобедренной призм из стекла К8  $\epsilon_1 = 5^\circ 40'$ , а из стекла БК10  $\epsilon_1 = 8^\circ 28'$ . Удвоенное значение этих углов даёт величину угл. поля прибора, где располагается О. п. Введение О. п. в пучок лучей эквивалентно постановке на его пути плоскопараллельной пластинки с толщиной, равной расстоянию, к-рое проходит луч в призм.



Рис. 1. Ограничение угла падения луча на входную грань призм.

О. п. используют для изменения направления пучка света, уменьшения длины оптич. системы, обратачивания изображения. Для этих же целей используются и зеркала. Однако О. п. имеют перед зеркалами след. преимущества: 1) меньшие габариты оптич. системы; 2) отсутствие потерь света при полном внутр. отражении; 3) угол между гранями О. п. неизменны, а между зеркалами требуют регулровки.

О. п. могут быть с одной, двумя и тремя отражающими гранями, с крышей, одинарными и составными (рис. 2). Ход лучей в гл. сечении О. п. таков, что призма с чётным числом отражающих граней даёт прямое изоб-

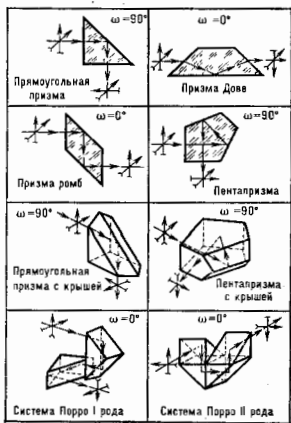


Рис. 2. Типы наиболее распространённых отражательных призм:  $\omega$  — угол отклонения луча; стрелки, перпендикулярные лучам, указывают ориентацию исходного изображения и изображения, преобразованного призмой.

ражение, а с нечётным — зеркальное или перевернутое. Это правило не действует при отражении в разных плоскостях. О. п. можно превратить в О. п. с крышей, если одну из отражающих граней заменить двумя с прямым двугранным углом между ними. Крышеобразные О. п. обеспечивают поворот изображения справа налево и наоборот. Сложные составные О. п. (рис. 2, системы Порро I и II) позволяют одновременно неск. ф-ций: изменяют длину оптич. системы, направление оптич. оси системы и обрабатывают изображение.

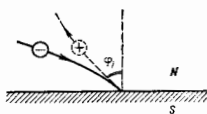
Лит.: Теория оптических систем, 2 изд., М., 1981.

**ОТРАЖЕНИЕ АНДРЕЕВСКОЕ** — отражение носителей заряда (электронов и дырок) в металле, находящемся в нормальном состоянии ( $N$ ), от границы со сверхпроводником ( $S$ ); при этом происходит изменение знаков массы и заряда носителей: превращение электрона в дырку или дырки в электрон. Ввиду сохранения энергии  $\epsilon$  носителей и практически точного сохранения импульса  $p$  при О. а. происходит изменение направления вектора скорости  $v$  на противоположное. Вместо классич. закона зеркального отражения угол падения равен углу отражения при О. а. отражённый носитель заряда движется точно назад (А. Ф. Андреев, 1964) [1, 2].

О. а. обусловлено наличием щели  $\Delta$  в энергетич. спектре электронов сверхпроводника (см. *Сверхпроводимость*). При  $\epsilon < \Delta$  носители заряда не могут проникнуть в сверхпроводник. В то же время они обладают импульсом  $p \gg \Delta/v$ , т. к. в металле  $p \approx p_F$ , где  $p_F$  — ферми-импульс. При отражении от  $N-S$  границы тангенциальная компонента импульса  $p_t$  сохраняется точно, а перпендикулярная компонента  $p_n$  может измениться лишь на величину  $\Delta p_n \lesssim \Delta/v$ . Если угол падения  $\phi$  далек от  $90^\circ$ , то  $\Delta p_n \ll p_n$ . Поэтому обычное зеркальное отражение, при к-ром  $\Delta p_n \lesssim p_n$ , невозможно. Малые изменения импульса  $\Delta p_n \approx \Delta/v$  соответствуют переходу с электронной ветви энергии спектра нормального металла на дырочную. При О. а. электрон ( $p > p_F$ ) подхватывает другой с антипараллельным импульсом, меньшим  $p_F$ , и образует куперовскую пару (см. *Купера эффект*), распространяющуюся без потерь вдоль поверхности сверхпроводника [3]. В нормальном металле остаётся дырка с импульсом, противоположным импульсу подхваченного электрона, что соответствует изменению знака  $v$  при О. а. При касательном падении  $\phi \approx 90^\circ$  вероятность обычного зеркального отражения заметно возрастает.

При  $\epsilon > \Delta$  вероятность О. а. уменьшается, если  $\epsilon \gg \Delta$ , О. а. не происходит.

Граница раздела  $N-S$  может быть создана внутри однородного металла, находящегося при низкой темп-ре  $T < T_c$  ( $T_c$  — критическая темп-ра сверхпроводящего перехода), с помощью неоднородного магн. поля  $H$ . В той области, где  $H > H_c$  ( $H_c$  — критическое магнитное поле сверхпроводника), металл находится в нормальном состоянии. Из выражения для циклотронной частоты  $\Omega = eH/mc$  следует, что при одноврем. изменении знаков заряда  $e$  и массы  $m$  направление вращения носителей в магн. поле не меняется. Поэтому центры кривизны траекторий электрона и дырки в точке отражения лежат по разные стороны от общей касательной (рис.).



Аккреивное отражение электрона от границы сверхпроводник ( $S$ ) — нормальный металл ( $N$ ).

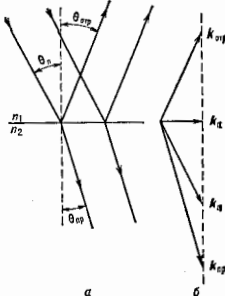
В промежуточном состоянии сверхпроводников первого рода объект металла разбивается на чередующиеся области  $N$ - и  $S$ -фаз. При одноврем. изменении знака заряда и вектора  $v$  носителей заряда при О. а. наличие

большого кол-ва таких границ не вносит дополнит. электрич. сопротивления. В то же время тепловое сопротивление чистых металлов в промежуточном состоянии сильно возрастает. Это послужило первым указанием на необычный характер отражения [4]. В дальнейшем О. а. наблюдалось экспериментально при радиочастотном *размерном эффекте* [5] и с помощью метода поперечной фокусировки электронов [6]. Явления, аналогичные О. а., наблюдаются также в жидком изотопе гелия —  $^3\text{He}$  в сверхтекучем состоянии.

Лит.: 1) Андреев А. Ф., Теплопроводность промежуточного состояния сверхпроводников, «ЖЭТФ», 1984, т. 46, с. 1823; 2) ето же в сб. Физгидродинамика промежуточного состояния сверхпроводников, «ЖЭТФ», 1986, т. 31, с. 1319; 3) Абрамов С. В. и А. А., Основы теории металлов, М., 1987; 4) Завацкий И. Н. В., Теплопроводность сверхпроводников в промежуточном состоянии, «ЖЭТФ», 1980, т. 38, с. 1673; 5) Крылов И. П., Шадрин Ю. В., Радиочастотный размерный эффект в слое нормального металла, граничащем со сверхпроводящей фазой, «ЖЭТФ», 1973, т. 64, с. 946; 6) Цой В. С., Цой Н. П., Яковлев С. Е., Поперечная электронная фокусировка как метод исследований Андреевского отражения, «ЖЭТФ», 1989, т. 95, с. 921.

**ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН** — переизлучение волн препятствиями с изменением направления распространения (вплоть до смены на противоположное). Отражающими объектами могут служить неоднородности среды (как резкие в масштабе длины волны  $\lambda$ , так и плавные), сочленения волноводных систем и изменения их геометрии, непрозрачные тела, в к-рых волны данной природы распространяться не могут. Обычно на границе раздела сред одновременно с О. в. происходит *преломление волн*.

При падении плоской монохроматич. волны на плоскую границу раздела двух однородных сред с разными свойствами происходит зеркальное О. в. (рис.). Амплитуда, фаза и направление распространения отражённой (прошедшей) волн определяются на основе согласования волновых полей по разные стороны от границы в соответствии с граничными условиями. Требования непрерывности фазы приводит к уни-



Отражение и преломление волн на плоской границе раздела двух сред с различными показателями преломления ( $n_2 > n_1$ ); а — лучевая картина падающей, отражённой и преломлённой волн на границу однородных.

версальному закону: тангенциальные (параллельные границе) составляющие волновых векторов падающей, отражённой и преломлённой волн  $k_{\parallel}^i = k_{\parallel}^r = k_{\parallel}^t = k_0 \sin \theta_0 = k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2$  должны быть равны между собой (рис., б). В случае изотропных неподвижных сред нормальные составляющие  $k_{\perp}^i = -k_{\perp}^r$  и допустима след. лучевая трактовка закона О. в.: 1) падающей и отражённой лучи лежат в одной, нормальной к границе, плоскости, 2) угол отражения  $\theta_{\text{отр}}$  (между лучом и нормалью) равен углу падения  $\theta_0$  (рис., а).

Интенсивность отражённой волны характеризуется коэф. отражения  $R$  (отношением интенсивностей отражённой и падающей волн), к-рый существенно зависит от природы волн, свойств обеих сред, поляризации волн и угла  $\theta_0$ . Для расчёта  $R$  необходимо удовлетворить специфическим для волн данной природы граничным условиям. Напр., в случае эл.-магн. волн граничные условия требуют, чтобы на границе тангенциальные составляющие напряжённости электр. и магн. полей были равны (см. *Френеля формулы*). В акустике гранич-

ные условия требуют, чтобы на границе раздела были равны давления в обеих средах и нормальные составляющие скорости частиц среды. В этом случае

$$R_2 = \left[ \frac{\cos \theta_2 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_2}}{\cos \theta_0 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}} \right]^2 \quad (1)$$

где  $n = n_2/n_1 = c_1/c_2$  — относительный показатель преломления,  $m = \rho_2/\rho_1$  — отношение плотностей сред.

В спец. случаях возможно безотражат. прохождения волны через границу (Брюстера закон). В (1) числитель обращается в нуль при  $\theta_2 = \theta_0$ , где  $\tan^2 \theta_0 = (n^2 - 1)/(n^2 + 1)$ . В оптике явление Брюстера наблюдается для волн, поляризованных в плоскости падения.

При  $n < 1$  и углах падения, больших критического  $\theta_c$  ( $\sin \theta_c = n$ ), имеет место полное внутреннее О. в. Числитель и знаменатель в (1) при  $\theta_0 > \theta_c$  становятся комплексно сопряжёнными и, следовательно,  $R_2 = 1 - \Gamma^2 = 1$ . Преломлённая волна при полном внутр. О. в. имеет вид поверхностной волны, экспоненциально прижатой к границе.

Идеальные отражающие экраны (зеркала) — предельный случай границы раздела сред, когда  $n \rightarrow \infty$  (абсолютно жёсткие стенки в акустике, идеально проводящие поверхности в электродинамике) или  $n \rightarrow 0$  (абсолютно податливые или идеальные магн. стенки соответственно). И в том и в другом случае  $R = 1$ .

Как отражённая, так и преломлённая волны являются, вообще говоря, результатом интерференции волн, переизлучённых в толще обеих сред. Законы зеркального О. в. могут быть обобщены и приближённо сформулированы как локальные для участка границы, если: 1) размеры, радиусы кривизны поверхностей и масштабы неоднородностей сред много больше длины волны  $\lambda$  (условия применимости геометрической оптики); 2) размеры неровностей границы  $\ll \lambda$ . Если размеры неровностей сравнимы с  $\lambda$ , то возможны два случая: при хаотич. расположении неровностей (перехватан граница) имеет место стохастич. рассеяние волн (ваз. также диффузным О. в.); при периодич. расположении неровностей (отражат. дифракционные решётки) кроме отражённой в зеркальном направлении волны возникает дискретный набор «побочных» волн, направления распространения к-рых зависят от  $\lambda$ , что используется в анализаторах спектра.

О. в. от движущихся объектов происходит со смещением частоты (Доплера эффект), угол отражения при этом не равен углу падения (т. и. углов абберации). В средах с непрерывно меняющимися свойствами О. в. наблюдается, если характерные масштабы неоднородности  $L \lesssim \lambda$ . В плавно-неоднородных средах  $L \gg \lambda$  «истинное» О. в. экспоненциально мало, однако рефракция в плавно-неоднородных средах может привести к явлениям, сходным с О. в., напр. зеркальный мрак в пустыне (см. Рефракция звука, Рефракция света). В нелинейных средах волны большой интенсивности сами индуцируют неоднородности, при рассеянии на которых (вынужденное рассеяние) может даже возникать, например, специфическое О. в. с обращением волнового фронта.

О. в. лежит в основе мн. природных явлений (эхо, миражи, подводные звуковые каналы в океане, радиоканалы в ионосфере), техн. устройств и систем (волноводы, резонаторы, гидролокация, радиолокация). В нек-рых случаях О. в. приводит к вредным последствиям: повышению уровня шумов, гиперреверберации в залах, сленнях бликам, искажению телевизионных изображений. Для борьбы с паразитным О. в. применяются поглощающие покрытия, согласующие элементы (в волноводной технике), четвертьволновые плёнки («голубая» оптика), плавные в масштабе длины волны переходные слои и др.

В общем случае О. в. не может рассматриваться изолированно от явлений прохождения волн (преломления, просачивания), поглощения, рассеяния, дифракции

волн и преобразования волн (преобразования в волны др. физ. природы или в волны с другой пространственной структурой). Выделение отражённых волн из полного волнового поля в известной мере условно и традиционно связано с лучевой трактовкой процесса распространения и теорией переноса изображений; к О. в., как правило, относят только тот класс явлений, в к-рых восстанавливается изображение источника (правильное или искажённое).

Лит.: Горелик Г. С., Колебания и волны, 2 изд., М., 1959; Крэдфорд Ф. Ф., Волны, пер. с англ., 3 изд., М., 1984; Пирс Д. Ж., Почти все о волнах, пер. с англ., М., 1976; М. А. Миллер, Г. В. Перриштин.

**ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА** — явление, возникающее при падении звуковой волны на границу раздела двух упругих сред и состоящее в образовании волн, распространяющихся от границы раздела в ту же среду, из к-рой пришла падающая волна. Как правило, О. з. сопровождается образованием преломлённых волн во второй среде. Частый случай О. з. — отражение от свободной поверхности. Обычно рассматривается отражение на плоских границах раздела, однако можно говорить об О. з. от препятствий произвольной формы, если размеры препятствия значительно больше длины звуковой волны. В противном случае имеет место рассеяние звука или дифракция звука.

Падающая волна вызывает движение границы раздела сред, в результате к-рого и возникает отражённые и преломлённые волны. Их структура и интенсивность должны быть таковы, чтобы по обе стороны от границы раздела скорости частиц и упругие напряжения, действующие на границу раздела, были равны. Граничные условия на свободной поверхности состоят в равенстве нулю упругих напряжений, действующих на эту поверхность.

Отражённые волны могут совпадать по типу поляризации с падающей волной, а могут иметь и др. поляризацию. В последнем случае говорят о преобразовании, или конверсии, мод при отражении или преломлении. Конверсия отсутствует только при отражении звуковой волны, распространяющейся в жидкости, поскольку в жидкой среде существуют лишь продольные волны. При прохождении звуковой волной границы раздела твёрдых тел образуются, как правило, и продольные и поперечные отражённые и преломлённые волны. Сложный характер О. з. имеет место на границе кристаллич. сред, где в общем случае возникает отражённые и преломлённые волны трёх раз. поляризации.

**Отражение плоских волн** [1—6]. Особую роль играет отражение плоских волн, поскольку плоские волны, отражаясь и преломляясь, остаются плоскими, а отражение волн произвольной формы можно рассматривать как отражение совокупности плоских волн. Ко-во возникающих отражённых и преломлённых волн определяется характером упругих свойств сред и числом акустич. ветвей, существующих в них. В силу граничных условий проекция на плоскость раздела волновых векторов падающей, отражённых и преломлённых волн равны между собой (рис. 1). Отсюда следуют законы отражения и преломления, согласно к-рым: 1) волновые векторы падающей  $K_1$ , отражённых  $K_2$  и преломлённых  $K_3$  волн  $\perp$  нормальному

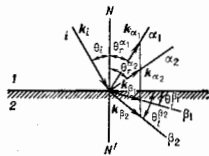


Рис. 1. Схема отражения и преломления плоской звуковой волны на плоской границе раздела.

$NN'$  к границе раздела лежат в одной плоскости (плоскости падения); 2) отношения синусов углов падения  $\theta_1$ , отражения  $\theta_2$  и преломления  $\theta_3$  к фазовым

скоростям  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  соответствующих волн равны между собой:

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2} = \frac{\sin \theta_3}{c_3} \quad (1)$$

(индексы  $\alpha$  и  $\beta$  обозначают поляризации отражённых и преломлённых волн). В изотропных средах, где направления волновых векторов совпадают с направлениями звуковых лучей, законы отражения и преломления принимают привычную форму закона Снеллиа. В анизотропных средах законы отражения определяют только направления волновых нормалей; как будут распространяться преломлённые или отражённые лучи, зависит от направления лучевых скоростей, соответствующих этим нормальям.

При достаточно малых углах падения все отражённые и преломлённые волны представляют собой плоские волны, уносящие энергию падающего излучения от границы раздела. Однако, если скорость  $c_2$  для к.-л. преломлённой волны  $\beta$  больше скорости  $c_1$  падающей волны, то для углов падения, больших  $\theta_1$ , т. е. критич. угла  $\theta_0 = \arcsin(c_1/c_2)$ , нормальная компонента  $k_z^{\beta}$  волнового вектора соответствующей преломлённой волны становится мнимой, а сама прошедшая волна превращается в неоднородную волну, бегущую вдоль поверхности раздела и экспоненциально убывающую в глубину среды 2. Однако падение волны на границу раздела под углом, большим критического  $\theta_0$ , может и не приводить к полному отражению, поскольку энергия падающего излучения может проникать во 2-ю среду в виде волн другой поляризации.

Критич. угол существует и для отражённых волн, если при  $O. z.$  происходит конверсия мод и фазовая скорость волны  $c_2$ , возникающей в результате конверсии, больше скорости  $c_1$  падающей волны. Для углов падения, меньших критич. угла  $\theta_0 = \arcsin(c_1/c_2)$ , часть падающей энергии уносится от границы в виде отражённой волны с поляризацией  $\alpha$ ; при  $\theta_1 > \theta_0$  такая волна оказывается неоднородной, затухающей в глубину среды 1, и не принимает участия в переносе энергии от границы раздела. Напр., критич. угол  $\theta_{Lz} = \arcsin(c_1/c_L)$  возникает при отражении поперечной акустич. волны  $T$  от границы изотропного твёрдого тела и конверсия её в продольную волну  $L$  ( $c_L$  и  $c_1$  — скорости поперечной и продольной звуковой волны соответственно).

Амплитуды отражённых  $A_1^{\beta}$  и преломлённых  $A_2^{\alpha}$  волн в соответствии с граничными условиями линейным образом выражаются через амплитуду  $A_1^{\alpha}$  падающей волны, подобно тому, как эти величины в оптике выражаются через амплитуду падающей эл.-магн. волны с помощью Френеля формул. Отражение плоской волны количественно характеризуется амплитудным коэф. отражения, представляющими собой отношения амплитуд отражённых волн к амплитуде падающей:  $R_{\alpha} = A_1^{\beta}/A_1^{\alpha}$ . Амплитудные коэф. отражения в общем случае комплексны: их модули определяют отношения абс. значений амплитуд, а фазы задают фазовые сдвиги отражённых волн. Аналогично определяются и амплитудные коэф. прохождения  $T_2^{\beta} = A_2^{\beta}/A_1^{\alpha}$ . Перераспределение энергии падающего излучения между отражёнными и преломлёнными волнами характеризуется коэф. отражения  $R_1^{\alpha}$  и прохождения  $T_1^{\beta}$  по интенсивности, представляющими собой отношения нормальных к границе раздела компонент средних по времени плотностей потоков энергии в отражённой (преломлённой) и в падающей волнах:

$$R_{\alpha} = \frac{I_1^{\beta} \cos \theta_1^{\beta}}{I_1^{\alpha} \cos \theta_1^{\alpha}} = \frac{c_2 \cos \theta_1^{\beta}}{c_1 \cos \theta_1^{\alpha}} \left| \frac{A_1^{\beta}}{A_1^{\alpha}} \right|^2 \quad (2)$$

$$T_1^{\beta} = \frac{I_2^{\beta} \cos \theta_2^{\beta}}{I_1^{\alpha} \cos \theta_1^{\alpha}} = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_2^{\beta}}{\rho_1 c_1 \cos \theta_1^{\alpha}} \left| \frac{A_2^{\beta}}{A_1^{\alpha}} \right|^2$$

где  $I_1^{\alpha}$ ,  $I_1^{\beta}$ ,  $I_2^{\beta}$  — интенсивности звука в соответствующих волнах,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности соприкасающихся сред. Баланс энергии, подводимой к границе раздела и уносимой от неё, сводится к балансу нормальных компонент потоков энергии:

$$\sum_{\alpha} R_1^{\alpha} + \sum_{\beta} T_1^{\beta} = 1. \quad (3)$$

Коэф. отражения зависит как от акустич. свойств соприкасающихся сред, так и от угла падения  $\theta_1$ . Характер угл. зависимости определяется наличием критич. углов, а также углов нулевого отражения  $\theta_{0\alpha}$ , при падении под к-рами отражённая волна с поляризацией  $\alpha$  не образуется.

**О. з. на границе двух жидкостей** [1—3]. Наиб. простая картина **O. з.** возникает на границе раздела двух жидкостей. Конверсия волн при этом отсутствует, и отражение происходит по зеркальному закону, а коэф. отражения равен

$$R(\theta_1) = \frac{1 - \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \sqrt{\frac{c_1^2}{c_2^2} - \sin^2 \theta_0 / \cos^2 \theta} \right)}{1 + \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \sqrt{\frac{c_1^2}{c_2^2} - \sin^2 \theta_0 / \cos^2 \theta} \right)}, \quad (4)$$

где  $\rho_{1,2}$  и  $c_{1,2}$  — плотности и скорости звука в граничащих средах 1 и 2. Если скорость звука для падающей волны больше скорости звука для преломлённой ( $c_1 > c_2$ ), то критич. угол отсутствует. Коэф. отражения действителен и плавно меняется от значения

$$R_0 = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (5)$$

при нормальном падении волны на границу раздела до значения  $R = -1$  при скольжении падения ( $\theta_1 = \pi/2$ ). Если акустич. импеданс  $\rho_2 c_2$  среды 2 больше импеданса  $\rho_1 c_1$  среды 1, то при угле падения

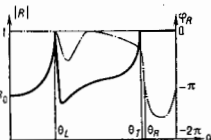
$$\theta_0 = \arcsin \sqrt{(\rho_2^2 c_2^2 - \rho_1^2 c_1^2) / c_1^2 (\rho_2^2 - \rho_1^2)} \quad (6)$$

коэф. отражения обращается в нуль и всё падающее излучение полностью проходит в среду 2.

Когда  $c_1 < c_2$ , возникает критический угол  $\theta_{\text{крит}} = \arcsin(c_1/c_2)$ . При  $\theta_1 < \theta_{\text{крит}}$  коэф. отражения — действительная величина; фазовый сдвиг между падающей и отражённой волнами отсутствует. Величина коэф. отражения меняется от значения  $R_0$  при нормальном падении до  $R = 1$  при угле падения, равном критическому. Нулевое отражение и в этом случае может иметь место, если для акустич. импедансов сред выполняется обратное неравенство  $\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1$ ; угол нулевого отражения по-прежнему определяется выражением (6). Для углов падения, больших критического, имеет место полное внутр. отражение:  $|R(\theta_1)| \equiv 1$ , и падающее излучение в глубину среды 2 не проникает. В среде 2, однако, формируется неоднородная волна; с её возникновением связаны комплексные коэф. отражения и соответствующий фазовый сдвиг между отражённой и падающей волнами. Этот сдвиг объясняется тем, что поле отражённой волны формируется в результате интерференции двух волн: зеркально отражённой волны и волны, преломляемой в среду 1 неоднородной волной, возникшей в среде 2. При отражении неплоских (напр., сферических) волн такая преломлённая волна наблюдается реально в эксперименте в виде т. в. боковой волны (см. Волны, раздел Отражение и преломление волн).

**О. з. от границы твёрдого тела** [1—3, 5—7]. Характер отражения усложняется, если отражателем является твёрдое тело. Когда скорость звука  $c$  в жидкости меньше скорости продольной  $c_L$  и поперечной  $c_T$  звука в твёрдом теле, при отражении на границе жидкости с твёрдым телом возникают два критич. угла: продоль-

ный  $\theta_L = \arcsin(c/c_L)$  и поперечный  $\theta_T = \arcsin(c/c_T)$ . При этом  $\theta_T > \theta_L$ , поскольку всегда  $c_L > c_T$ . При углах падения  $\theta_i < \theta_L$  коэф. отражения действителен (рис. 2). Падающее излучение проникает в твёрдое тело в виде



как продольной, так и поперечной преломлённых волн. При нормальном падении звука в твёрдом теле возникает только продольная волна и значение  $R_0$  определяется отношением продольных акуст. импедансов жидкости  $\rho_{жс}$  и твёрдого тела  $\rho_{сL}$  аналогично Фле (5) ( $\rho_{жс}$  — плотность жидкости и твёрдого тела).

При  $\theta_i > \theta_L$  коэф. отражения становится комплексным, поскольку в твёрдом теле вблизи границы образуется неоднородная волна. При углах падения, заключённых между критич. углами  $\theta_L$  и  $\theta_T$ , часть падающего излучения проникает в глубь твёрдого тела в виде преломлённой поперечной волны. Поэтому для  $\theta_L < \theta_i < \theta_T$  величина  $|R(\theta_i)| < 1$ ; лишь при  $\theta_i = \theta_L$  поперечная волна не образуется и  $|R| = 1$ . Участие неоднородной продольной волны в формировании отражённого излучения обуславливает, как и на границе двух жидкостей, фазовый сдвиг у отражённой волны. При  $\theta_i > \theta_T$  имеет место полное внутр. отражение:  $|R(\theta_i)| \equiv 1$ . В твёрдом теле вблизи границы образуются лишь экспоненциально спадающие в глубь тела неоднородные волны. Фазовый сдвиг у отражённой волны для углов  $\theta_i > \theta_T$  связан в основном с возбуждением на границе раздела в эте к а ж ей *Рэлея волны*. Такая волна возникает на границе твёрдого тела с жидкостью при углах падения, близких к углу Рэлея  $\theta_R = \arcsin(c/c_R)$ , где  $c_R$  — скорость волны Рэлея на поверхности твёрдого тела. Распространяясь вдоль поверхности раздела, вытекающая волна полностью превращается в жидкость.

Если  $c > c_T$ , то полное внутр. отражение на границе жидкости с твёрдым телом отсутствует; падающее излучение проникает в твёрдое тело при любом угле падения, по крайней мере в виде поперечной волны. Полное отражение возникает при падении звуковой волны под критич. углом  $\theta_L$  или при скольжении падения. При  $c > c_L$  коэф. отражения действительный, т. к. неоднородные волны на границе раздела не образуются.

О. з., распространяющегося в твёрдом теле [5,6]. При распространении звука в изотропном твёрдом теле наиб. простой характер носит отражение сдвиговых волн, направление колебаний в к-рых параллельно плоскости раздела. Конверсия мод при отражении или преломлении таких волн отсутствует. При падении на свободную границу или границу раздела с жидкостью такая волна отражается полностью ( $R = 1$ ) по закону зеркального отражения. На границе раздела двух изотропных твёрдых тел наряду с зеркально отражённой волной в среде 2 образуется преломлённая волна с поляризацей, также параллельной границе раздела.

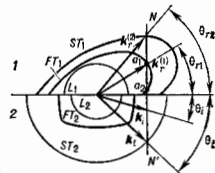
При падении поперечной волны, поляризованной в плоскости падения, на свободную поверхность тела, на границе возникает как отражённая поперечная волна той же поляризации, так и продольная волна. При углах падения  $\theta_i$ , меньших критического угла  $\theta_{TL} = \arcsin(c_T/c_L)$ , коэф. отражения  $R_T$  и  $R_L$  — чисто действительные; отражённые волны уходят от границы точно в фазе (или в противофазе) с падающей волной. При  $\theta_i > \theta_{TL}$  от границы уходит только зеркально отражённая поперечная волна; вблизи свободной поверхности образуется неоднородная продольная волна.

Коэф. отражения становится комплексным, и между отражённой и падающей волнами возникает фазовый сдвиг, величина к-рого зависит от угла падения. При отражении от свободной поверхности твёрдого тела продольной волны при любом угле падения возникает как отражённая продольная волна, так и поперечная волна, поляризованная в плоскости падения.

Если граница твёрдого тела находится в контакте с жидкостью, то при отражении волн (продольной или поперечной, поляризованной в плоскости падения) в жидкости дополнительно возникает преломлённая продольная волна. На границе раздела двух изотропных твёрдых сред к этой системе отражённых и преломлённых волн добавляется ещё преломлённая поперечная волна в среде 2. Её поляризация также лежит в плоскости падения.

О. з. на границе раздела анизотропных сред [6]. О. з. на границе раздела кристаллич. сред носит сложный характер. Скорости  $c_e$  и  $c_s$  отражённых и преломлённых волн в этом случае сами являются функциями углов отражения  $\theta^*$  и преломления  $\theta^{\#}$  (см. *Кристаллооптика*); поэтому даже определение углов  $\theta_i$  и  $\theta_t$  по заданному углу падения  $\theta_i$  сталкивается с серьёзными матем. трудностями. Если известны сечения поверхности волновых векторов плоскостью падения, то используется графич. метод определения углов  $\theta_i$  и  $\theta_t$ : концы волновых векторов  $k_i$  и  $k_t$  лежат на перпендикуляре  $NN'$ , проведённом к границе раздела через концы волнового вектора  $k_i$  падающей волны, в точках, где этот перпендикуляр пересекает разл. полости поверхностей волновых векторов (рис. 3). Кол-во отражённых (или преломлённых) волн, реально распространяющихся от границы раздела в глубь соответствующей среды, определяется тем, со сколькими полостями пересекается перпендикуляр  $NN'$ . Если пересечение с к.-л. полостью отсутст-

Рис. 3. Графический метод определения углов отражения и преломления на границе раздела кристаллических сред 1 и 2.  $L, FT$  и  $ST$  — поверхности волновых векторов для изаириродных, быстрых и медленных квазиизотропных волн соответственно.



вует, то это означает, что волна соответствующей поляризации оказывается неоднородной и энергию от границы не переносит. Перпендикуляр  $NN'$  может пересекать одну и ту же полость в неск. точках (точки  $a_1$  и  $a_2$  на рис. 3). Из возможных положений волнового вектора  $k_t$  (или  $k_s$ ) реально наблюдаемым волнам соответствуют лишь те, для к-рых вектор лучевой скорости, совпадающий по направлению с внеш. нормалью к поверхности волновых векторов, направлен от границы в глубь соответствующей среды.

Как правило, отражённые (преломлённые) волны принадлежат разл. ветвям акустич. колебаний. Однако в кристаллах со значит. анизотропией, когда поверхность волновых векторов имеет волгнутые участки (рис. 4), возможно отражение с образованием двух отражённых или преломлённых волн, принадлежащих одной и той же ветви колебаний.

На опыте наблюдаются конечные лучи звуковых волн, направления распространения к-рых определяются лучевыми скоростями. Направления лучей в кристаллах значительно отличаются от направлений соответствующих волновых векторов. Лучевые скорости падающей, отражённых и преломлённых волн лежат в одной плоскости лишь в исключительных случаях, напр. когда плоскость падения является плоскостью симметрии для обеих кристаллич. сред. В общем случае отражённые и преломлённые лучи занимают разнообразные по-

ложения как по отношению друг к другу, так и по отношению к падающему лучу и нормали  $NN'$  к границе раздела. В частности, отраженный луч может лежать в плоскости падения по ту же сторону от нормали  $N$ , что



Рис. 4. Отражение акустической волны, падающей на свободную поверхность кристалла с образованием двух отраженных волн той же поляризации: а — определение волновых векторов отраженных волн ( $c_1$  — векторы лучевой скорости); б — схема отражения звуковых пучков конечного сечения.

и падающий луч. Предельным случаем такой возможности является наложение отраженного пучка на падающий при наклонном падении последнего.

Влияние затухания на характер О. з. [8,9]. Коэф. отражения и прохождения не зависит от частоты звука, если затухание звука в обеих граничных средах пренебрежимо мало. Заметное затухание приводит не только к частотной зависимости коэф. отражения  $R$ , но и искажает его зависимость от угла падения, в особенности вблизи критич. углов (рис. 5, а). При отражении от границы раздела жидкости с твердым телом эффекты затухания существенно меняют угловую зависимость  $R$  при углах падения, близких к релеевскому углу  $\theta_R$  (рис. 5, б). На границе сред с пренебрежимо малым затуханием при таких углах падения имеет место полное внутреннее отражение и  $|R| = 1$  (кривая 1 на рис. 5, б). Наличие затухания приводит к тому, что  $|R|$  становится меньше 1, а вблизи  $\theta_1 = \theta_R$  образуется минимум

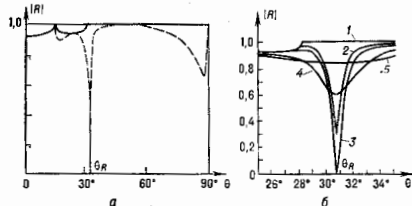


Рис. 5. Угловая зависимость  $|R|$  на границе вода — сталь с учетом затухания: а — общий характер угловой зависимости  $|R|$ ; сплошная линия — без учета потерь, штриховая линия — то же с учетом затухания; б — угловая зависимость  $|R|$  вблизи релеевского угла  $\theta_R$  при различных значениях поглощения ( $\alpha d$ ) потеревших воды в стали на длине волны. Кривые 1—3 соответствуют увеличению этого параметра от значения  $\alpha d \approx 3 \cdot 10^{-4}$  (кривая 1) до значения  $\alpha d = 1$  (кривая 3) за счет соответствующего возрастания частоты падающего УЗ-излучения.

$|R|$  (кривые 2—4). По мере увеличения частоты и соответствующего роста коэф. затухания глубина минимума увеличивается, пока, наконец, на вектор частоте  $f_0$  наз. частотой нулевого отражения, мин. значение  $|R|$  не обратится в нуль (кривая 3, рис. 5, б). Дальнейший рост частоты приводит к уширению минимума (кривая 4) и влиянию эффектов затухания на О. з. практически для любых углов падения (кривая 5). Уменьшение амплитуды отраженной волны по сравнению с амплитудой падающей не означает, что падающее излучение проникает в твердое тело. Оно связано с поглощением вытекающей волны Рэлея, к-рая возбуждается падающим излучением и участвует в формировании отраженной волны. Когда звуковая частота  $f$  равна частоте  $f_0$ , вся энергия падающей волны диссипируется на границе раздела.

О. з. от слоев и пластин [4,3,5,6,10,11]. О. з. от слоя или пластины носит резонансный характер. Отраженная и прошедшая волны формируются в результате многократных переотражений волн на границах слоя. В случае жидкого слоя падающая волна проникает в слой под углом преломления  $\theta_1$ , определяемым из закона Снелли. За счет переотражений в самом слое возникают продольные волны, распространяющиеся в прямом и обратном направлениях под углом  $\theta_1$  к нормали, проведенной к границам слоя (рис. 6, а). Угол  $\theta_1$  представляет собой угол преломления, отвечающий углу падения  $\theta_1$  на границу слоя. Если скорость звука в слое  $c_2$  больше скорости звука  $c_1$  в окружающей жидкости, то система переотраженных волн возникает лишь тогда, когда  $\theta_1$  меньше угла полного внутр. отражения  $\theta_{\text{крит}} = \arcsin(c_1/c_2)$ . Однако для достаточно тонких слоев прошедшая волна образуется и при углах падения, больших критического. В этом случае коэф. отражения от слоя оказывается по абс. величине меньше 1. Это связано с тем, что при  $\theta_1 > \theta_{\text{крит}}$  в слое вблизи той же границы, на к-рую падает извне волна, возникает неоднородная волна, экспоненциально спадающая в глубь слоя. Если толщина слоя  $d$  меньше или сравнима с глубиной проникновения неоднородной волны, то последняя возмущает противоположную границу слоя, в результате чего с ней излучается в окружающую жидкость прошедшая волна. Это явление просачивания волны аналогично просачиванию частиц через потенциальный барьер в квантовой механике.

Коэф. отражения от слоя

$$R = \frac{R_1 + R_2 \exp 2ik_{xz}d}{1 + R_1 R_2 \exp 2ik_{xz}d}, \quad (7)$$

где  $k_{xz} = 2\pi(f/c_2) \cos \theta_1$  — нормальная компонента волнового вектора в слое, ось  $z$  — перпендикулярна границам слоя,  $R_1$  и  $R_2$  — коэф. О. з. соответственно на

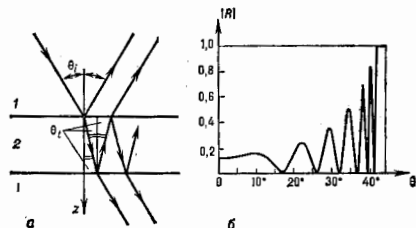


Рис. 6. Отражение звуковой волны от жидкого слоя: а — схема отражения; 1 — окружающая жидкость; 2 — слой; б — зависимость модуля коэффициента отражения  $|R|$  от угла падения  $\theta$ .

верхней и нижней границах. При  $\theta_1 < \theta_{\text{крит}}$   $|R|$  представляет собой периодич. ф-цию звуковой частоты  $f$  и толщины слоя  $d$ . При  $\theta_1 > \theta_{\text{крит}}$  когда имеет место просачивание волны через слой,  $|R|$  при увеличении  $f$  или  $d$  монотонно стремится к 1.

Как ф-ция угла падения  $\theta_1$  значение  $|R|$  имеет систему максимумов и минимумов (рис. 6, б). Если по обе стороны слоя находится одна и та же жидкость, то в точках минимума  $R = 0$ . Нулевое отражение возникает, когда набег фаз на толщине слоя равен целому числу полуциклов

$$k_{xz}d = \pi n \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (8)$$

и волны, выходящие в верхнюю среду после двух последовательных переотражений, будут находиться в противофазе и взаимно гасить друг друга. Наоборот, в нижней среде все переотраженные волны выйдут с одной и той же фазой, и амплитуда прошедшей волны окажется максимальной. При нормальном падении волны



на слой полное пропускание имеет место, когда на д-шине слой укладывается целое число полутолщ:  $d = \frac{1}{2} \lambda_p n_p$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\lambda_p$  — длина звуковой волны в материале слоя; поэтому слой, для к-рых выполнено условие (8), наз. полупроводниками. Соотношение (8) совпадает с условием существования нормальной волны в свободном жидком слое. В силу этого полное пропускание через слой возникает, когда падающее излучение возбуждает в слое ту или иную нормальную волну. За счёт контакта слоя с окружающей жидкостью нормальная волна является вытекающей: при своём распространении она полностью превращает энергию падающего излучения в нижнюю среду.

Когда жидкости по разные стороны от слоя различны, наличие полупроводного слоя никак не сказывается на падающей волне: коэф. отражения от слоя равен коэф. отражения от границы этих жидкостей при их непосредств. контакте. Помимо полупроводных слоёв в акустике, как и в оптике, большое значение имеют т. н. четвертьволновые слои, толщина к-рых удовлетворяют условию  $k_2 d = \pi/2 + \pi n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). Подобранным соответствующим образом акустич. impedance слоя, можно получить нулевое отражение от слоя волн с заданной частотой  $f$  при определённом угле падения её на слой. Такие слои используются в качестве просветляющих акустических слоёв.

Для отражения звуковой волны от бесконечной твёрдой пластины, погружённой в жидкость, характер отражения, описанный выше для жидкого слоя, в общих чертах сохраняется. При преобразованиях в пластине дополнительно к продольным будут также возбуждаться сдвиговые волны. Углы  $\theta_{Lr}$  и  $\theta_{Tr}$ , под к-рыми распространяются соответственно продольные и поперечные волны в пластине, связаны с углом падения законом Снеллиа. Угл. и частотная зависимости  $|R|$  будут представлять собой, как и в случае отражения от жидкого слоя, системы чередующихся максимумов и минимумов. Полное пропускание через пластину возникает в том случае, когда падающее излучение возбуждает в ней одну из нормальных волн, представляющих собой вытекающие Лэмба волны. Резонансный характер О. э. от слоя или пластины старается по мере того, как уменьшается отличие их акустич. свойств от свойств окружающей среды. Увеличение акустич. затухания в слое также приводит к сглаживанию зависимостей  $|R(\theta, f)|$  и  $|R(f, \theta)|$ .

**Отражение неплоских волн** [1—3, 7, 12]. Реально существуют только неплоские волны; их отражение может быть сведено к отражению набора плоских волн. Монохроматич. волну с волновым фронтом произвольной формы можно представить в виде совокупности плоских волн с одной и той же круговой частотой  $\omega$ , но с разл. направлениями волнового вектора  $\mathbf{k}$ . Осн. характеристикой падающего излучения является его пространственный спектр — набор амплитуд  $A(\mathbf{k})$  плоских волн, образующих в совокупности падающую волну. Абс. величина  $\mathbf{k}$  определяется частотой  $\omega$ , поэтому его компоненты не являются независимыми. При отражении от плоскости  $z = 0$  нормальной компонента  $k_z$  задается тангенциальными компонентами  $k_x, k_y$ :  $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ . Каждая плоская волна, входящая в состав падающего излучения, падает на границу раздела вод своим углом  $\theta$  и отражается независимо от других волн. Поле  $\Phi(r)$  отражённой волны возникает как суперпозиция всех отражённых плоских волн и выражается через пространственный спектр падающего излучения  $A(k_x, k_y)$  и коэф. отражения  $R(k_x, k_y)$ :

$$\Phi(x, y, z) = \iint R(k_x, k_y) A(k_x, k_y) \exp(i k_x x + i k_y y + i k_z z) dk_x dk_y.$$

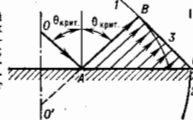
Интегрирование распространяется на область сколь угодно больших значений  $k_x$  и  $k_y$ . Если пространственный спектр падающего излучения содержит (как при

отражении сферич. волн) компоненты с  $k_x$  (или  $k_y$ ), большими  $\omega/c$ , т. е. в формировании отражённой волны помимо волн с действительными  $k_x$  принимают участие также невоображаемые волны, для к-рых  $k_x$  — чисто мнимая величина. Этот подход, предложенный в 1919 Г. Вейлем (H. Weyl) и получивший своё дальнейшее развитие в представлениях Фурье-оптики, даёт последоват. описание отражения волны произвольной формы от плоской границы раздела.

При рассмотрении О. э. возможен также лучевой подход, к-рый основан на принципах *геометрической акустики*. Падающее излучение рассматривается как совокупность лучей, взаимодействующих с границей раздела. При этом учитывается, что падающие лучи не только отражаются и преломляются обычным образом, но, считаясь законом Снеллиа, но и что часть лучей, падающих на поверхность раздела под определёнными углами, возбуждает т. н. боковые волны, а также вытекающие поверхностные волны (Рэлея и др.) или вытекающие волноводные моды (Лэмба волны и др.). Распространяясь вдоль поверхности раздела, такие волны вновь переизлучаются в среду и участвуют в формировании отражённой волны. Для практики осн. значение имеет отражение сферич. волн, коллимированных акустич. пучков конечного сечения и фокусированных звуковых пучков.

**Отражение сферических волн** [1—3]. Картина отражения сферич. волн, создаваемой в жидкости  $I$  точечным источником  $O$ , зависит от соотношения между скоростями звука  $c_1$  и  $c_2$  в соприкасающихся жидкостях  $I$  и  $II$  (рис. 7). Если  $c_2 > c_1$ , то критич. угол отсутствует

Рис. 7. Отражение сферической волны на границе раздела двух жидкостей.  $O$  и  $O'$  — действительный и мнимый источники;  $J$  — фронт отражённой сферической волны;  $2$  — фронт преломлённой волны;  $3$  — фронт боковой волны.



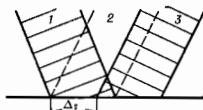
и отражение происходит по законам геом. акустики. В среде  $I$  возникает отражённая сферич. волна; отражённые лучи пересекаются в точке  $O'$ , образуя мнимое изображение источника, а волновой фронт отражённой волны представляет собой часть сферы с центром в точке  $O'$ .

Когда  $c_2 > c_1$  и имеется критич. угол  $\theta_{\text{крит.}}$  в среде  $I$  помимо отражённой сферич. волны возникает ещё одна компонента отражённого излучения. Лучи, падающие на границу раздела под углом  $\theta_{\text{крит.}}$  возбуждают в среде  $II$  волну, к-рая распространяется со скоростью  $c_2$  вдоль поверхности — раздела и переизлучается в среду  $I$ , формируя т. н. боковую волну. Её фронт образуют точки, до к-рых в один и тот же момент времени дошли лучи, вышедшие из точки  $O$  вдоль  $OO'$  и затем перешедшие снова в среду  $I$  в разл. точках границы раздела от точки  $A$  до точки  $C$ , в к-рой в этот момент находится фронт преломлённой волны. В плоскости чертежа фронт боковой волны представляет собой прямоугольный отрезок  $CB$ , наклонённый к границе под углом  $\theta_{\text{крит.}}$  и распространяющийся до точки  $V$ , где он смыкается с фронтом зеркально отражённой сферич. волны. В пространстве фронт боковой волны представляет собой поверхность усечённого конуса, возникающего при вращении отрезка  $CB$  вокруг прямой  $OO'$ . При отражении сферич. волн в жидкости от поверхности твёрдого тела подобная же картина образуется за счёт возбуждения на границе раздела вытекающей рэлеянской волны. Отражение сферич. волн — один из основных эксперим. методов геоакустики, сейсмологии, гидроакустики и акустики океана.

**Отражение акустических пучков конечного сечения** [1, 3, 7, 12]. Отражение коллимированных звуковых пучков, волновой фронт к-рых в осн. части пучка близок к плоскому, происходит для большинства углов падения

так, будто отражается плоская волна. При отражении пучка, падающего из жидкости на границу раздела с твердым телом, возникает отраженный пучок, форма к-рого является зеркальным отражением распределения амплитуды в падающем пучке. Однако при углах падения, близких к предельному критич. углу  $\theta_L$  или разлесскому углу  $\theta_R$ , наряду с зеркальным отражением происходит эфф. возбуждение боковой или вытекающей ролесской волны. Поле отраженного пучка в этом случае является суперпозицией зеркально отраженного пучка и неразлученных волн. В зависимости от ширины пучка, уругих и вязких свойств граничащих сред возникает либо латеральный (параллельный) сдвиг пучка в плоскости раздела (т. н. смещение Шоха) (рис. 8), либо существенное уширение пучка и появление тонкой

Рис. 8. Латеральное смещение пучка при отражении: 1 — падающий пучок; 2 — зеркально отраженный пучок; 3 — реально отраженный пучок.

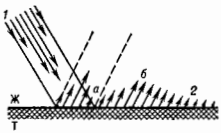


структуры. При падении пучка под углом Резля характер искажений определяется соотношением между шириной пучка  $l$  и радиан, загуханием вытекающей разлесской волны

$$\alpha_R = A \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{c_1^2}{c_2} \frac{1}{\lambda},$$

где  $\lambda$  — длина звуковой волны в жидкости,  $A$  — числовой множитель, близкий к единице. Если ширина пучка значительно больше длины радиан, загухания ( $\alpha_R \gg 1$ ), происходит лишь смещение пучка вдоль поверхности раздела на величину  $\Delta x = 2/\alpha_R$ . В случае узкого пучка ( $\alpha_R < 1$ ) за счёт неразлучения вытекающей поверхностной волны пучок существенно уширяется и перестаёт быть симметричным (рис. 9). Внутри области, занитой зеркально отраженным пучком, в результате интерференции возникает нулевой минимум амплитуды и пучок распадается на две части. Незеркальное отражение коллимиров. пучков возникает и на границе двух жидкостей при углах падения, близких к критическому, а также при отражении пучков от слоёв или пла-

Рис. 9. Отражение звукового пучка изменённого сечения, падающего из жидкости Ж на поверхность твёрдого тела Т под углом Резля: 1 — падающий пучок; 2 — отраженный пучок; а — область нулевой амплитуды; б — область хвоста пучка.



стин. В последнем случае незеркальный характер отражения обусловлен возбуждением в слое или пластине вытекающих волноводных мод. Существенную роль играют боковые и вытекающие волны при отражении фокусированных УЗ-пучков. В частности, эти волны используются в *микроскопии акустической для формирования* акустич. изображений и проведения количеств. измерений.

Лит.: 1) Бреховский Л. М. Волны в слоистых средах, 2 изд., М., 1973; 2) Дэвидсон П. Д., Лифшиц Е. М., Гидродинамика, 4 изд., М., 1986; 3) Бреховский Л. М., Голдин О. А., Акустика слоистых сред, М., 1988; 4) Sagalaid L., Reflection et réfraction des ondes séismiques progressives, Р., 1939; 5) Вильдг. В. М., Задворский В. С., Пресс Р. Elastic waves in layered media, N. Y. — [a. o.], 1957, ch. 3; 6) Auld B. A., Acoustic fields and waves in solids, v. 2, N. Y. — [a. o.], 1973; 7) Вертонов И. Л., Тамм И. Т., Unified theory of Rayleigh-angle phenomena for acoustic beams at liquid-solid interfaces, «Appl. Phys.», 1973, v. 2, № 4, p. 157; 8) Mott G., Reflection and refraction coefficients at a fluid-solid interface, «J. Acoust. Soc. Amer.», 1971, v. 50, № 3 (pt. 2), p. 619; 9) F. L. Richards and R. L., Influence of material properties on Rayleigh critical-angle reflectivity,

«J. Acoust. Soc. Amer.», 1972, v. 51, № 5 (pt. 2), p. 1609; 10) F. L. Richards, Oberfall H., Resonance theory of acoustic reflection and transmission through a fluid layer, «J. Acoust. Soc. Amer.», 1979, v. 65, № 1, p. 3; 11) F. L. Richards, M. A. Diggs, W. Oberfall H., Resonance theory of acoustic waves interacting with an elastic plate, «J. Acoust. Soc. Amer.», 1979, v. 68, № 6, p. 1857; 12) Neubaer W. G., Observation of acoustic radiation from plane and curved surfaces, в кн.: Physical acoustics. Principles and methods, ed. by W. P. Mason, R. N. Thurston, v. 10, N. Y. — [a. o.], 1973, ch. 2. В. М. Лыкин.

**ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН** — отражение волн электромагн. природы в диапазоне от сверхдлинных волн вплоть до границы СВЧ-диапазона (см. Радиоволны). Как и в случае световых волн, О. р. обусловлено резким (в пределах длин эл.-магн. волн) изменением макроскоп. параметров среды, характеризующих распространение радиоволн: диэлектрич. ( $\epsilon$ ) и магн. ( $\mu$ ) проницаемостей. Для О. р. справедливы все общие закономерности отражения волн. Важность и специфика О. р. обусловлены его широким использованием в практике радиосвязи, радиоакустики, радионавигации, телевидения и исследования окружающей среды и как следствие — большим разнообразием свойств  $\epsilon$  и  $\mu$  отражающих сред и геометрии отражающих объектов. В случае О. р. от резкой границы протяжённых объектов (длина волны  $\lambda \ll l$  — характерного размера отражающего тела) с гладким покрытием (диэлектрич. и металлич. покрытия, снежная, водная и др. поверхности) имеет место зеркальное О. р., к-рое описывается Френеля формулами. При наличии шероховатостей отражающей поверхности происходит диффузное отражение. При размере тела  $l \ll \lambda$  отражается малая часть энергии волны (частичное О. р.). На основании зеркального, диффузного и частичного О. р. основаны радиолокация и радиоизонирование. Зеркальное О. р. наблюдается в параболол. антеннах, радиодысотамерах, ионозондах и т. д. Диффузное О. р. происходит, напр., при радиолокации планет с космич. аппаратов. О. р. от движущихся объектов сопровождается изменением частоты отражённой волны (см. Доплера эффект). Этот эффект широко используется для определения скорости отражающих объектов.

Эффективное О. р. происходит от объёмных неоднородностей в среде размером  $\lambda \sim l$ , что встречается в практике исследования атмосферы (отражение санити-, милли- и субмиллиметровых волн от частиц пыли, осадков и аэрозолей). Аналогичный эффект возникает в среде с непрерывным заполнением слабыми ( $\Delta\epsilon/\epsilon \ll 1$ ,  $\Delta\mu/\mu \ll 1$ ) неоднородностями диэлектрич. (либо магн.) проницаемости. При этом осн. роль играет О. р. от дифракционной решётки с пространственным периодом  $l_p \sim \lambda$ , образованной неоднородностями среды. На этом эффекте основан т. н. метод частичных отражений для исследования атм. и ионосферных неоднородностей. Приёмом для увеличения эффективности О. р. используют искусственно созданные дифракц. решётки с тем же пространств. периодом  $l_p$  (при радиоакустич. зондировании атмосферы и нек-рых др. исследованиях нижней ионосферы).

О. р. сильно зависит от геом. характеристик и резонансных свойств отражающего объекта (см. Волновой, Волновой металлеческий, Волновое распространение радиоволн). Напр., тонкая диэлектрич. (или магн.) пластина толщиной  $d$  порядка длины падающей волны  $\lambda$  в зависимости от соотношения  $d$  и  $\lambda$  может дать либо полное отражение, либо полное прохождение радиоволн. На этом эффекте основаны селективные по частоте запирающие либо согласующие устройства. При плавных изменениях  $\epsilon$  и  $\mu$  О. р. происходит от слоя, в к-ром составляющая волнового вектора волны в проекции на град  $\epsilon$  (или град  $\mu$ ) обращается в нуль. О. р. при этом описывается Снелля законом и др. законами геом. оптики. Последоват. многократное О. р. от поверхности Земли и ионосферы является основой загоризонтной радиолокации и радиосвязи (см. Загоризонтное распространение радиоволн). В то же время многократные О. р. в городах вносят помехи для телевидения и радиовещания.

нии. На О. р. от носферсы существенно сказывается плазменный резонанс, к-рый возникает, когда частота радиоволн приближается к плазменной частоте электронов носферсы плазмы. В области плазменного резонанса происходит взаимодействие падающей волны с обслв. колебаниями носферсы, что приводит к модификации коэф. О. р., резко усиливаются нелинейные эффекты. Нелинейное О. р. сопровождается дополнит. амплитудой и фазовой модуляцией, изменением *дифракции* *направленности* отражённого пучка радиоволн, аномальным поглощением (см. *Распространение радиоволн*). Аналогичные эффекты могут иметь место при О. р. от лоб. плазмы, а также от плазменных оболочек, возникающих вокруг движущихся в атмосфере космич. объектов.

Лит.: Г и я в б у р г В. П., *Распространение электромагнитных волн в плазме*, 2 изд., М., 1967; Г у р е в и ч А. В., Ш в а р ц б у р г А. В., *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере*, М., 1973; Радиолокационные методы исследования Земли, М., 1980; Я к о в л е в О. И., *Распространение радиоволн в космосе*, М., 1985.

Н. А. Мильков, В. Ю. Трахтенберг.

**ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА** — возникновение вторичных световых волн, распространяющихся от границы раздела двух сред «обратно» а первую среду, из к-рой первоначально падал свет. При этом по крайней мере первая среда должна быть прозрачна для падающего и отражаемого излучений. Несомненно, что тела становятся видимыми вследствие О. с. от их поверхностей.

Пространств. распределение интенсивности отражённого света зависит от соотношения между размерами шероховатостей  $\lambda$  поверхности (границы раздела) и длиной волны  $\lambda$  падающего излучения. Если  $\lambda \ll \lambda$ , то О. с. направленные, ил. з е р к а л ь н о е. Когда размеры шероховатостей  $\lambda \approx \lambda$  или превышают её (перехватные, матовые поверхности) и расположением шероховатостей стохастические. О. с. — д и ф ф у з и о н о е. Возможно также смешанное О. с., при к-ром часть падающего излучения отражается зеркально, а часть диффузно. Если же шероховатости с размерами  $\approx \lambda$  расположены к-л. регулярным образом, то распределение отражённого света имеет особый характер, близкий к наблюдаемому при О. с. от дифракц. решётки.

Зеркальное О. с. характеризуется связью положений падающего и отражённого лучей: 1) отражённый, преломлённый и падающий лучи и нормаль к плоскости падения компланарны; 2) угол падения равен углу отражения. Совместно с законом прямолинейного распространения света эти законы составляют основу *геометрической оптики*. Для понимания физ. особенностей, возникающих при О. с., таких, как изменение амплитуды, фазы, поляризации света, используется эл.-магн. теория света, в основе к-рой лежат ур-ния Максвелла. Они устанавливают связь параметров отражённого света с оптич. характеристиками вещества — оптич. постоянными  $n$  и  $k$ , составляющими комплексного показателя преломления  $\tilde{n} = n - ik$ ;  $n$  — отношение скорости в вакууме к фазовой скорости волны в веществе,  $k$  — гл. безразмерный показатель поглощения. Параметры отражённого света могут быть получены из ур-ния волны, к-рое удовлетворяет решению ур-ний Максвелла:

$$E = E_0 \exp(-2\pi k z / \lambda) \exp[i\omega(t - n z / c)],$$

где  $E_0$  — нач. амплитуда волны, распространяющейся в поглощающей среде,  $\omega$  — круговая частота,  $\lambda$  — длина волны,  $z$  — направление распространения волны,  $t$  — время.

Величина  $k$  связана с натуральным показателем поглощения  $\alpha = 4\pi k / \lambda$ , к-рый обычно определяется из традиц. фотометрич. измерений (см. *Бугера — Ламберта — Бера закон*). Параметр  $k$  характеризует затухание амплитуды световой волны, к-рая при прохождении расстояния, равного  $\lambda / 2\pi k$ , ослабляется в  $e$  раз.

Это расстояние может служить мерой глубины проникновения света в приграничный слой поглощающего вещества, где происходит формирование отражённой

волны. В слабо поглощающем веществе ( $k < 0,1$ ) свет проникает на глубину порядка  $\lambda$ , а при сильном поглощении ( $k \gg 0,1$ ) глубина проникновения намного меньше  $\lambda$ . При О. с. от границы с сильно поглощающим веществом эл.-магн. волна не может проникнуть в эту среду на значит. глубину, в результате чего поглощается только малая часть энергии и на малом участке пути, а большая часть отражается.

При падении световой волны по нормали к идеально плоской поверхности амплитуды отражённой и преломлённой световых волн могут быть получены из ур-ния волны в предположении непрерывности тангенциальных составляющих электрич. вектора при переходе из одной среды в другую. С учётом оптич. свойств границы раздела сред непосредственно получают связь между амплитудами волн падающей, отражённой и прошедшей. При нормальном падении света амплитудный коэф. отражения

$$r = \frac{\tilde{n}_2 - \tilde{n}_1}{\tilde{n}_2 + \tilde{n}_1},$$

где  $\tilde{n}_1$  и  $\tilde{n}_2$  — показатели преломления граничащих сред.

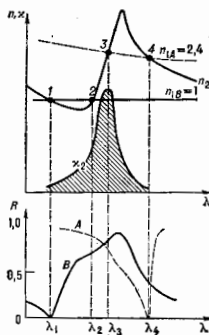
Энергетич. коэф. отражения, характеризующий мощность отражённой волны  $R = |r|^2$ , а для границы воздух — среда

$$R = \frac{(n_1 - 1)^2 + k_1^2}{(n_1 + 1)^2 + k_1^2}.$$

Для прозрачных диэлектриков ( $k = 0$ ) величина  $R$  мала; напр., для границы воздух — стекло ( $n_{\text{возд}} = 1,00$ ;  $n_{\text{ст}} = 1,52$ )  $R = 0,04$ . При нормальном падении света величина коэф. отражения не зависит от того, из какой среды, первой или второй, свет падает на границу раздела. При прохождении плоской стеклянной пластинки, к-рая имеет две границы, теряется 8% от падающей мощности светового пучка, т. е. коэф. пропускания прозрачной пластинки составляет 0,92. При распространении света через систему из  $m$  оптич. элементов (пластинок, призм, линз и т. д.) доля прошедшего света составляет  $(1 - R)/(1 + (m + 1)R)$ . Если показатели преломления двух сред близки ( $n_1 \approx n_2$ ), то коэф. О. с. очень мал; напр., для границы стекло — вода ( $n_{\text{ст}} = 1,53$ )  $R = 0,004$ . По данным Рэлея, для границы стекло — воздух  $R = 4 \cdot 10^{-8}$ . На практике реализовать ситуацию  $n_1 = n_2$  чрезвычайно трудно из-за переходных поверхностных слоёв на границе двух сред.

В дальних УФ- и ИК-областях, в к-рых диэлектрики характеризуются сильным поглощением ( $k > 1$ ), коэф. О. с. достигает значений  $R > 0,9$ . В этих спектральных областях происходит резкое изменение дисперсии показателей преломления; напр., для ионич. кристаллов значения  $n$  изменяются от 0,1 до 10. Вследствие аномальной дисперсии (к-рая всегда есть в области сильного изменения  $k$ ) появляются две характерные точки пересечения кривых дисперсий граничащих сред, для к-рых  $n_1 = n_2$ , а показатель поглощения для одной из этих точек  $k < 0,1$ , а для другой  $k > 1$ . В результате и в спектре отражения наблюдается минимум в области малого поглощения ( $k < 0,1$ ); напр., для кварцевого стекла вблизи осн. полосы поглощения  $\lambda = 9$  мкм величина  $R = 0,00006$ ; для  $k > 1$   $R = 0,75$ . На рис. 1 (вверху) изображены дисперсионные кривые  $n(\lambda)$  для двух «первых» оптичски прозрачных сред — воздуха ( $n_{10} = 1$ ) и алмаза ( $n_{10}$ ) и для второй среды  $n_2$  в окрестности её полосы поглощения  $\lambda_2(\lambda)$ . Для воздуха и второй среды при равенстве  $n_{10} \approx n_2$  (точки 1 и 2) наблюдается минимум в спектре отражения (рис. 1, внизу), когда  $k_2 < 0,1$  на длине волны  $\lambda_1$ . Для алмаза и второй среды при равенстве  $n_{10} \approx n_2$  (точки 3 и 4) минимум в спектре отражения наблюдается на длине волны  $\lambda_4$  тоже при малом поглощении ( $k_2 < 0,1$ ).

При О. с. происходит сдвиг фаз  $\delta$  между амплитудами падающей и отражённой волны. Если свет падает по нормали из воздуха на поверхность прозрачного ди-



электрика, величина  $\delta = \pi$ ; при обратном ходе света из диэлектрика в воздух  $\delta = 0$ . Если имеется поглощение света, то сдвиг фаз отражённого света при нормальном падении из воздуха определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \delta = -\frac{2\kappa_2}{1 - n_1^2 - \kappa_2^2}$$

При слабом поглощении ( $\kappa < 0,1$ ) глубина проник-

Рис. 1. Вверху: дисперсионные кривые показателя преломления воздуха, алмаза и среды  $n_2$  в окрестности полосы поглощения  $\kappa_2$ . Внизу: спектры отражения границы сред  $n_1$  и  $n_2$ ; А — алмаз — ионный кристалл,  $\varphi \approx 60^\circ$ ; В — воздух — ионный кристалл,  $\varphi = 0^\circ$ .

новения света в вещество составляет относительно большую величину  $\sim \lambda$ , потому сдвиг фаз для прозрачной и слабо поглощающей сред практически одинаков.

О. с. от прозрачных диэлектриков при наклонном падении с учётом разделения падающего пучка на две равнозначные компоненты, у  $\kappa$ -рых электрич. вектор Е перпендикулярен ( $s$ -компонента) и параллелен ( $p$ -компонента) плоскости падения, описывается Френеля формулами

$$r_s = -\frac{\sin(\varphi - \theta)}{\sin(\varphi + \theta)}, \quad r_p = \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \theta)}{\operatorname{tg}(\varphi + \theta)},$$

где  $\varphi$  и  $\theta$  — углы падения и преломления соответственно.

Для прозрачных диэлектриков выделяют две характерных случая О. с.: отражение от оптически более плотной среды ( $n_1 < n_2$ ,  $\varphi > \theta$ ) и отражение от оптически менее плотной среды ( $n_1 > n_2$ ,  $\varphi < \theta$ ).

В случае  $n_1 < n_2$  компонента  $R_s = |r_s|^2$  плавно возрастает (рис. 2, а) от значений при  $\varphi = 0$  (нормальное падение) до  $R = 1$  при  $\varphi = 90^\circ$ . Компонента  $R_p = R_s$

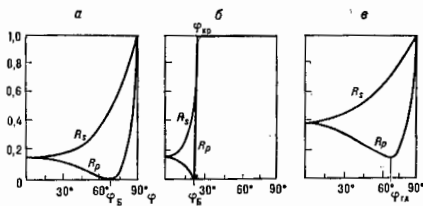


Рис. 2. Зависимость энергетических коэффициентов отражения  $R_s$  и  $R_p$  от угла падения  $\varphi$  для прозрачных диэлектриков: а)  $n_1 < n_2$  (воздух — алмаз); б)  $n_1 < n_2$  (алмаз — воздух); в) поглощающей среды (платина,  $n_2 = 2,00$ ,  $\kappa_2 = 2,03$ ).

при нормальном падении, а с ростом угла падения плавно уменьшается до нуля при т. н. угле Брюстера  $\varphi_B = \arctg(n_2/n_1)$ ;  $\varphi_B + \theta = 90^\circ$ . Свет, отражённый при угле  $\varphi_B$ , полностью поляризован, что используется в оптич. приборах для получения и анализа параметров поляризов. света.

При отражении фаза  $s$ -компоненты волны меняется на  $\pi$  для всех значений  $\varphi$  от 0 до  $90^\circ$ , а для  $p$ -компоненты фаза меняется на  $\pi$  для значений  $\varphi$  от 0 до  $\varphi_B$ , а при  $\varphi > \varphi_B$  не меняется. Если падающий свет естественный, то коэф. отражения  $R = 1/2 (R_s + R_p)$ .

При отражении от оптически менее плотной среды ( $n_1 > n_2$ ) различают две области: до и после критич. угла  $\varphi_{кр} = \arcsin(n_2/n_1)$ ,  $\kappa$ -рый также наз. углом полного внутр. отражения. При угле  $\varphi < \varphi_{кр}$  коэф. отражения  $R_s$  и  $R_p$  меняются так же, как и для предыдущего случая с заменой  $\varphi \leftrightarrow \theta$  и  $n_1 \leftrightarrow n_2$ . Т. е. волна, падающая из первой среды на вторую под углом  $\theta$ , отражается так же, как волна, падающая из второй среды на первую под углом  $\theta$ . При угле  $\varphi \geq \varphi_{кр}$  происходит полное отражение энергии падающего света, т. е.  $R = 1$  (рис. 2, б). В окрестности  $\varphi_{кр}$  происходит резкое изменение коэф. отражения; так, напр., для границы стекло — воздух при отклонении от  $\varphi_{кр}$  на  $1^\circ R$  уменьшается до 0,9; последующее изменение угла на  $30^\circ$  приводит к падению  $R$  до 0,25. Высокая чувствительность коэф. отражения вблизи  $\varphi_{кр}$  широко используется в оптич. приборах — рефрактометрах, предназначенных для контроля показателя преломления. Вблизи  $\varphi_{кр}$  находится и угол полной поляризации ( $\varphi_p$ ), где  $R_p = 0$ . При полном внутр. отражении  $p$ - и  $s$ -компоненты волны преломляются с скачки фаз  $\delta_p$  и  $\delta_s$ ,  $\kappa$ -рые определяются соотношением

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_s}{2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \operatorname{tg} \frac{\delta_p}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2 \varphi - (n_2/n_1)^2}}{\cos \varphi}$$

При  $\varphi < \varphi_p$  фаза  $s$ - и  $p$ -компонент не меняется; при  $\varphi > \varphi_p$  фаза  $s$ -компоненты остаётся без изменения, а  $p$ -компоненты меняется на  $\pi$ . При  $\varphi > \varphi_{кр}$  сдвиг фаз  $s$ - и  $p$ -компонент отражённого света различен, в результате чего линейно поляризов. свет после отражения становится эллиптически поляризованным.

О. с. от поглощающих поверхностей при наклонном падении может быть проанализировано с помощью ф-л Френеля при подстановке в них комплексного показателя преломления и учёте Снелля закона преломления  $n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \theta$ . В результате получаются сложные выражения, связывающие коэф. отражения  $R$  и оптич. постоянные  $n$  и  $\kappa$ ,  $\kappa$ -рые для преломлённого луча имеют смысл эфф. величин  $n_p$ ,  $\kappa_p$ , т. к. они уже зависят от угла падения, причём угол преломления становится комплексным. Происходит это в результате неоднородности волн в сильно поглощающих средах (таких, как, напр., металлы): плоскости равных фаз и амплитуд не совпадают, амплитуда этих волн меняется вдоль фронта волны, причём плоскость равных амплитуд параллельна границе отражения. Действит. член  $\chi$  угла преломления определяется как угол между нормалью к отражающей границе и нормалью к поверхности равных фаз. При  $\varphi = 0$  (нормальное падение) значения  $n_p = n$  и  $\kappa_p = \kappa$  наз. главными. Главные и эффективные оптич. постоянные связаны соотношениями  $n_p^2 - \chi_p^2 = n^2 - \kappa^2$ ;  $n_p \chi_p \cos \chi = \kappa$  (т. е. инварианты Кеттелера) не зависящими от угла падения. Наб. сильной зависимости оптич. постоянных от  $\varphi$  выражена для металлов с  $n < 1$  (напр., благородные металлы) и гораздо слабее для диэлектриков, где и выполняется закон Снелля.

О. с. от поглощающих сред имеет ряд особенностей: отражающая граница вблизи  $\varphi_{кр}$  становится нерезкой; отсутствует угол полной поляризации, хотя  $p$ -компонента имеет минимум (рис. 2, в) при угле,  $\kappa$ -рый наз. главным  $\varphi_{гл}$ . Для  $gl$  угла падения разность фаз между  $p$ - и  $s$ -компонентами  $\delta_p - \delta_s = \pi/2$ . Скачки фаз при отражении, различные для  $p$ - и  $s$ -компонент, приводят к тому, что линейно поляризов. свет после отражения становится эллиптически поляризованным.

Особенности раал. параметров отражённого света лежат в основе целого ряда методов исследования оптич. постоянных прозрачных и поглощающих конденсиров. сред (включая и тонкие плёнки). К таким методам относятся рефрактометрия, фотометрия, амплитудная, нарушенное полное внутреннее отражение. Общее аналитич. решение, позволяющее находить обе оптич. постоянные по измеренным  $R_s$  и  $R_p$  или  $\delta_s$  и  $\delta_p$ , довольно громоздко и требует по крайней мере двух независимых

змерений, напр. коэф. отражения при двух углах ф. Однако, если проводить измерения в широкой области частот  $\omega$ , то можно измерять  $R$  только при одном угле падения; затем с помощью Крамера — Кронга соотношений по спектру  $R_{s,p}(\omega)$  находят фазу отражённой волны  $\delta_s(\omega)$  или  $\delta_p(\omega)$ , а далее по ф-лам Френеля для амплитудных коэф. отражения  $r_s(\omega)$  или  $r_p(\omega)$  определяют  $n(\omega)$  и  $k(\omega)$ .

Рассмотренный выше подход, базирующийся на уравнениях Максвелла, позволяет описывать особенности  $O. c.$  на феноменологич. уровне. Не вскрывая механизма взаимосвязей оптич. свойств вещества с его атомным строением, он устанавливает соотношение между макрохарактеристиками — оптич. постоянными среды  $n, k$  и её электрич. параметрами — диэлектрич. проницаемостью  $\epsilon$  и электропроводностью  $\sigma$ :

$$n^2 - k^2 = \epsilon; \quad nk = \frac{2\sigma}{\omega}.$$

Взаимосвязь макро- и микропараметров среды была обоснована микроскопич. электронной теорией Х. А. Лоренца (1880), рассматривающей электрон (атом) как осциллятор, а среду как набор частиц-осцилляторов. Падающая световая волна вызывает колебания в частицах, в результате чего они излучают волны, когерентные с падающей. Вторичная волна одного атома действует на др. атомы и вызывает их дополнит. излучение; интерференция всех этих волн с падающей объясняет все явления отражения и преломления. Если расстояния между частицами  $\ll \lambda$  (что справедливо для оптич. диапазона) и если плотности частиц одинакова во всём объёме среды, то расчёт по молекулярной теории приводит к тем же выводам, что и феноменологич. теория. Именно в «среде» вторичные волны «гасят» падающую и создают преломлённую; все «среды» интерференцию вторичных волн приводит к образованию отражённой волны с амплитудой, описываемой ф-лами Френеля. Если расстояния между частицами сравнимо с  $\lambda$  (в рентг. области), то феноменологич. теория неправомерна, необходим другой подход (см. Дифракция рентгеновских лучей). Тепловое движение частиц нарушает постоянно их плотности и приводит к новому явлению — молекулярному рассеянию света.

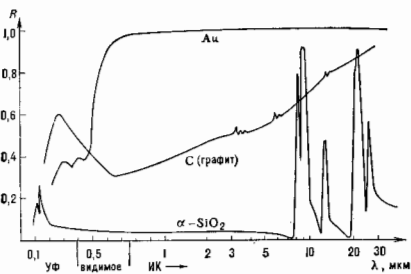


Рис. 3. Спектры коэффициентов отражения диэлектрика ( $\alpha$ -кварца), металла (Au) и монокристаллического графита.

В поглощающих средах (хорошо проводящих металлах) падающая волна поглощается практически полностью в тонком ( $\sim 10$  нм) слое; энергия её превращается в энергию движения электронной плазмы. Движущиеся электроны излучают, в результате чего формируются отражённая волна, уносящая до 99% энергии (подробнее см. Металлооптика).

Спектры отражения в УФ-, видимой и ИК-областях типичного представителя металлов (Au) и диэлектриков ( $\alpha$ -кварца) представлены на рис. 3. Хорошо виден общий резонансный характер  $O. c.$  в УФ-области у  $\alpha$ -кварца и золота, тогда как в ИК-области обнаружива-

ются качества, различия: у  $\alpha$ -кварца по-прежнему ярко выражена резонансная структура полос в спектре  $O. c.$ , а у золота — неселективное отражение, характерное для свободных носителей электрич. заряда. В промежуточной — видимой области в спектре  $O. c.$  золота с ростом  $\lambda$  происходит быстрое нарастание коэф. отражения. Спектр  $O. c.$  полуметалла (графит) в УФ-области имеет те же общие черты, а в ИК-области носит промежуточный характер, приближаясь с ростом  $\lambda$  к спектру металлов. Резонансные колебания кристаллич. решётки графита выражены в спектре  $O. c.$  в виде весьма слабых полос на фоне интенсивного неселективного отражения, обусловленного свободными носителями.

При рассмотренном выше  $O. c.$  предполагалось наличие идеально гладкой плоской отражающей границы. Реальная поверхность имеет микрошероховатости конечной высоты, трещины, адсорбиров. воду и т. п. Для точного измерения параметров отражённого света, на к-рые влияют тончайшие поверхностные слои, необходимо исключительно тщательная хим. очистка поверхности в устранение дефектов и нарушений структуры, вызванных обработкой. Наличие микрошероховатости приводит к нерегулярному рассеянию света по разным направлениям, причём для высококачеств. полировки потери на рассеяние могут составлять  $\sim 2 \cdot 10^{-8}$  от мощности падающего света. Если высота микрошероховатости  $h \geq \geq 0,2\lambda$ , то отражение диффузное; при  $h \leq 0,003\lambda$  отражение зеркальное. Коэф. зеркального  $O. c.$  от поверхности при нормальном падении в хорошем приближении описывается ф-лой  $R = R_0 \exp(-4\pi h/\lambda)^2$ , где  $R_0$  — отражение идеально гладкой поверхности. Металлич. зеркало, у к-рому потери на диффузное отражение составляют не более 0,1%, должно иметь  $h \leq 0,003\lambda$  в видимом диапазоне. При наклонном падении и при переходе в ИК-область требования к качеству полировки снижаются.

Диффузное  $O. c.$  представляет собой рассеивание света во всевозможных направлениях телом, к-рое имеет шероховатую поверхность либо обладает внутр. неоднородной структурой, ведущей к рассеянию света в его объёме.  $O. c.$  от шероховатой поверхности, представляющей собой совокупность различных по ориентации площадок с размерами  $\geq \lambda$ , сводится к отражению света этакими площадками в соответствии с ф-лами Френеля; угл. распределение яркости и поляризации диффузно отражённого света целиком определяется характером стохастич. распределения площадок по ориентациям.

Если  $O. c.$  обусловлено рассеянием на неоднородностях внутр. структуры самого тела (порошки, эмульсии, облака и т. п.), то явление носит объёмный характер и его закономерности определяются эффектами многократного рассеяния света, проникшего в тело. В этом случае даже слабое поглощение внутри тела приводит к резкому ослаблению многократно рассеянного света и уменьшению отражат. способности. Для очень тонких или сильно поглощающих сред существенно только однократное рассеяние, вследствие чего отражат. способность пропорц.  $\beta/\gamma$  ( $\beta$  и  $\gamma$  — объёмные коэф. рассеяния и поглощения). Т. к.  $\beta$  и  $\gamma$  зависят от степени дисперсности рассеивающего вещества, то и отражат. способность зависит от дисперсности: увеличивается по мере уменьшения рассеивающих частиц. Поляризация отражённого света также зависит от величины  $\beta/\gamma$ . Угл. распределение отражённого света определяется видом матрицы рассеяния и меняется с изменением  $\beta/\gamma$  и оптич. толщины слоя.

Для поверхностей, равномерно рассеивающих свет, часто пользуются (напр., при светотехн. расчётах) Ламберта законом, согласно к-рому яркость диффузно отражающего тела пропорц. его освещённости и не зависит от направления, в к-ром она рассматривается. Однако закон этот выполняется очень приблизительно, лишь для тел с высокой отражат. способностью и под углами наблюдения  $< 60^\circ$ .

О. с. от нелинейных сред. При больших мощностях световых (лазерных) полей ( $10^8 - 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>) обнаруживается нелинейность среды, к-рая может сказаться на О. с. Так, напр., при отражении от нелинейной среды (монокристалл GaAs) может возникнуть 2-я гармоника, если среда прозрачна для осн. частоты, но поглощает гармонику. При падении на нелинейную среду двух волн с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  возникает отраженная волна на суммарной частоте  $\omega_3 = \omega_2 + \omega_1$  (кроме обычных отраженных волн  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ). Интенсивность гармоники в отражённом свете имеет заметную величину при наблюдении *фазового синхронизма*. Необходимые условия синхронизма могут осуществляться разными способами. Напр., при отражении от кристалла подбракуют условия (выбором ориентации осей), когда осн. волна — обыкновенная, а 2-я гармоника — необыкновенная; тогда в нек-ром направлении скорость гармоники необыкновенной волны равна скорости основной обыкновенной. Благоприятные условия для синхронизма получаются при полном внутр. отражении, когда направление согласования фаз в кристалле лежит в отражающей плоскости, а угол падения соответствует  $\chi_{\text{нр}}$  для 2-й гармоники. При отражении мощной падающей волны наблюдается ряд параметрич. эффектов, связанных с оптич. Керра эффектом, с электрострикцией, с локальными нагревами и т. и. и приводящих к отступлению от ф-л Френеля (см. *Нелинейная оптика*).

Все несветящиеся предметы видны благодаря диффузному О. с. Если поверхность отражает зеркально, то видна не сама граница раздела, а изображения предметов, полученные при отражении от этой поверхности. О. с. может оказывать и вредное воздействие, приводя, напр., к появлению «бликов», уменьшению яркости и контрастности изображения. В этих случаях стараются уменьшить О. с., нанося на поверхность оптич. деталей спец. тонкие слои (см. *Простетские оптики*).

О. с. широко используется для определения оптич. характеристик вещества, выяснения его структуры, свойств, особенно в тех случаях, когда исследования на пропускание трудны или невозможны; в спектральном анализе, напр. в методе нарушенного полного внутр. отражения, к-рый даёт информацию о структуре поверхностных слоев, что важно для теории адсорбции, поверхностных и граничных явлений, катализа и т. п.

Лит.: Соколов А. В., Оптич. свойства металлов, М., 1961; Борови М., Вольф Ф., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973; Киэаль В. А., Отражение света, М., 1973; Золотарев В. М., Морозов В. П., Смирнова Е. В., Оптич. постоянные природных и технич. сред, Справочник, Л., 1984; В. М. Золотарев.

**ОТРАЖЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТ** — отношение потока излучения, отражённого телом, к упавшему на него потоку излучения. Иногда (напр., для радиоволн) пользуются понятием амплитудного О. к. — отношения амплитуд отражённой и падающей волн. В общем случае О. к. есть сумма коэф. зеркального и диффузного отражения (см. *Отражательные системы*).

**ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ДИСПЕРСИЯ** — см. в ст. *Дисперсия света*.

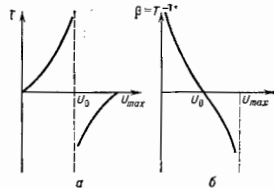
**ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ** — недостаток в излучении вещества (по сравнению с равновесным тепловым излучением), возникающий в том случае, когда населённость уровня энергии, с к-рого происходит соответствующий квантовый переход, меньше, чем при равновесных условиях. Неравновесная населённость уровня энергии создается внеш. воздействием на излучающую среду. Напр., в полупроводниках можно с помощью импульсного электрич. поля перевести электроны и дырки на противоположные стороны образца, что ослабляет рекомбинац. часть теплового излучения. Длительность такой О. л. после снятия воздействия определяется скоростью тепловой генерации свободных носителей заряда в полупроводнике и временем его дрейфа от его границ. О. л. характеризуется теми же параметрами, что и обычная люминесценция, но её вид (энергетич. и квантовый; см. *Выход люминесценция*)

считается отрицательным. Интенсивность О. л. всегда меньше интенсивности теплового излучения, поэтому её можно наблюдать только в ИК-области. Понятие О. л. введено в 1955 В. В. Антоновым-Романовским и др.

Лит.: Антонов-Романовский В. В. и др., Выход люминесценции системы с тремя уровнями энергии, «ДАН СССР», 1955, т. 105, № 1, с. 50; Степанов Б. И., Основы спектроскопии отрицательных световых потоков, Минск, 1961; Волгов С. С., Малотекно В. К., Пилия В. И., «Отрицательная люминесценция в полупроводниках», «Письма в ДТФ», 1979, т. 6, в. 23, с. 1444.

**ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА** — величина, удобная для термодинамич. описания неравновесных состояний квантовых систем с ограниченным спектром энергии. Это возможно при высокой степени изоляции системы от окружения, напр. для совокуности ядерных спинов в магн. поле, слабо взаимодействующих с решёткой. Время установления теплового равновесия в такой системе при низких темп-рах может достигать  $\sim 10$  мин, поэтому ядерную спиновую систему можно считать хорошо изолированной. Для любой подсистемы, обладающей конечным числом уровней энергии и достаточно хорошо изолированной от другой системы («стермстата», уровни к-рого могут и не иметь верхней границы), удобно понятие О. т.

В термодинамике обратная абс. темп-ра  $T^{-1}$  равна производной энтропии  $S$  по средней энергии  $U$  при постоянстве прочих параметров  $x$ :  $T^{-1} = (\partial S / \partial U)_x$ . Возможность О. т. означает, что эта производная может быть отрицательной (убывание энтропии с ростом средней энергии). Поскольку энтропия пропорц. логарифму числа допустимых состояний, при О. т. систему с большей вероятностью можно обнаружить на высоких уровнях, чем на низких. При этом ср. энергия может быть коветной лишь при ограниченном спектре энергии, тогда предположение об О. т. не приводит к противоречию (расходится статистич. суммы) в случае статистич. равновесия. В действительности все случаи О. т. относятся к неравновесным метастабильным состояниям и применение к ним равновесной термодинамики имеет условный характер. Зависимость  $T$  и  $\beta = 1/T$  от  $U$  для систем с ограниченным спектром представлена на рис., где  $U_0 = U(T=0)$ ,  $U_{\text{max}} = \lim_{T \rightarrow -0} U(T)$ .



Зависимость температуры  $T$  и величины  $\beta = 1/T$  от средней энергии  $U$  для систем с ограниченным спектром.

Состояние с О. т. можно достигнуть в системе ядерных спинов, для к-рых время релаксации  $t_2$  вследствие магн. взаимодействия между спинами значительно меньше времени релаксации  $t_1$  вследствие взаимодействия спинов с решёткой. Это было осуществлено в экспериментах Э. Пёрселла (E. Purcell) и Р. Паунда (R. Pound) в 1951. Кристалл намагничивался в сильном магн. поле, направление к-рого затем быстро изменялось на обратное, так что ядерные спины не успевали за ним следовать. После этого за время  $t_2$  в системе ядерных спинов устанавливалась квазиравновесие, т. е. она оказывалась в состоянии с О. т. Система приходила в равновесие с решёткой лишь за время  $t_1 \gg t_2$ .

В более узком смысле О. т. — условная величина, характеризующая степень инверсии населённости двух выбранных уровней энергии квантовой системы. В случае статистич. равновесия населённости  $N_1$  и  $N_2$  уровней 1 и 2 (т. е. равное число частиц в этих состояниях) связаны ф-лой Больцмана

$$N_2/N_1 = \exp(-(\epsilon_2 - \epsilon_1)/kT),$$

где  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — уровни энергии системы. Отсюда следует, что  $N_2 < N_1$  при  $\epsilon_2 > \epsilon_1$ , т. е. верхние уровни менее населены, чем нижние. Если воздействовать на систему монохроматич. излучением, частота к-рого близка к частоте перехода между уровнями  $\omega_{21} = (\epsilon_2 - \epsilon_1)/\hbar$  и отпадает от частот др. переходов, то можно получить *инверсию населенностей*, т. е. состояние, при к-ром населенность верхнего уровня больше населенности нижнего:  $N_2 > N_1$ . Применяя ф-лу Больцмана для оценки неравновесного состояния, можно ввести О. т. по отношению к паре уровней энергии  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ :

$$T = \hbar \omega_{21} / k \ln(N_1/N_2) < 0.$$

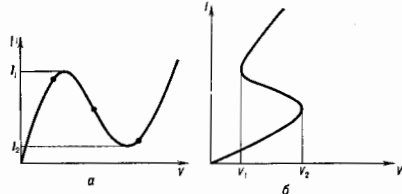
Несмотря на формальный характер этого определения, оно оказывается удобным, т. к. позволяет описывать флуктуации в равновесных и неравновесных системах одинаковым образом.

При воздействии эд.-магн. поля на подсистему, находящуюся при О. т., вместо резонансного поглощения получается *резонансное излучение*, связанное с процессом индуцированного испускания. С этими процессами связаны, напр., работа лазеров.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Статистическая физика, ч. 1, 3 изд., М., 1976, § 73; К и т л е в Ч., Элементарная статистическая физика, пер. с англ., М., 1960, § 24; Р у ж е р Ю. В., Р ы в а к и н М. Ш., Термодинамика, статистическая физика и кинетика, 2 изд., М., 1977, § 67.

Д. Н. Зубарев.

**ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ** — свойство отд. элементов или узлов электрич. цепей, проявляющееся в возникновении на вольт-амперной характеристике участка, где напряжение  $V$  уменьшается при увеличении протекающего тока  $I$  ( $dV/dI = R < 0$ ). О. д. с. — свойство нелинейных элементов и цепей; с точки зрения радиотехники такие элементы являются активными, позволяющими трансформировать энергию источника питания в незатухающие колебания. Такие элементы можно также использовать в схемах переключения. Зависимость  $V$  от  $I$  в нелинейном элементе с О. д. с. может быть  $N$ -типа (когда выбранному значению  $I$  в области значений от  $I_1$  до  $I_2$  соответствует неск. значений  $V$ ; рис., а) и  $S$ -типа (когда в области значений от  $V_1$  до  $V_2$  каждому значению  $V$  соответствует неск. значений  $I$ ; рис., б). В общем случае О. д. с.



является ф-цией напряжения (тока) и частоты  $\omega$ , т. е. понятие О. д. с. сохраняет смысл для соответствующих компонент Фурье:

$$R(\omega) = dV(\omega)/dI(\omega).$$

Понятие О. д. с. используют при рассмотрении устойчивости реал. радиотехн. цепей. О. д. с. может компенсировать век-рую часть потерь в электрич. цепи, если его абс. величина меньше активного сопротивления; в противоположном случае состояние становится неустойчивым, возможен переход в др. состояние устойчивого равновесия (переключение) или возникновение колебаний (генерация). В однородном образце полупроводника в области существования О. д. с. неустойчивость может приводить к разбеганию образца на участки сильного и слабого поля (доменная неустойчивость) для характе-

ристики  $N$ -типа или шунтированию тока по сечению образца для характеристики  $S$ -типа.

Примеры элементов с О. д. с. 1) Электронно-дырочный переход в вырожденных полупроводниках (*туннельный диод*) имеет вольт-амперную характеристику  $N$ -типа. Включение его в цепь приводит к возникновению в цепи неустойчивости и генерации колебаний. Амплитуда и частотный спектр колебаний определяются параметрами внеш. цепи и нелинейностью вольт-амперной характеристики с О. д. с. Наличие участка с О. д. с. позволяет использовать туннельный диод в качестве быстродействующего переключателя.

2) Полупроводники типа GaAs или InP в сильных электрич. полях позволяют реализовать характеристику  $N$ -типа в объеме материала за счёт зависимости подвижности электронов от напряжённости электрич. поля (*Галлия эффект*). В сильном электрич. поле образец становится неустойчивым, переходит в резко неоднородное состояние — развивается на области (домены) слабого и сильного поля. Рождение (на катоде), движение по образцу и исчезновение домена (на аноде) сопровождаются колебаниями тока во внеш. цепи, частота к-рых в простейшем случае определяется длиной образца  $L$  и скоростью  $v$  дрейфа электронов в поле ( $\omega \sim v/L$ ) и может достигать  $\sim 100$  ГГц.

3) В транзисторных и ламповых генераторах *электромагнитных колебаний* транзистор (лампа) вместе с цепью положительной обратной связи (и источником питания) играет роль О. д. с., соединённого последовательно с сопротивлением контура, что эквивалентно поступлению энергии в контур. Если абс. величина действующего О. д. с. превышает активные потери, происходит самовозбуждение генератора, стационарные колебания соответствуют состоянию, когда активные потери полностью компенсируются за счёт О. д. с.

Лит.: В о н ч - Б р у с в я ч А. М., Радиолэлектроника в экспериментальной физике, М., 1968; В о н ч - Б р у с в я ч В. Л., К а л а ш н и к о в С. Г., Физика полупроводников, М., 1977.

**ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ** в газах — атомы или молекулы газа, захватившие дополнительный электрон.

Атомный О. и. представляет собой связанное состояние атома и электрона; по своей структуре как система, состоящая из положительно заряженного ядра и электрона, О. и. подобен атому. Однако, в отличие от атома, в О. и. взаимодействие валентного электрона с атомом короткодействующее; поэтому число связанных состояний О. и. чаще всего одно, в то время как атом обладает бесконечным числом связанных состояний. Взаимодействие валентного электрона О. и. с атомом остатком носит обменный характер (см. *Обменное взаимодействие*). Поэтому способностью присоединить к электронной оболочке дополнительный электрон обладают атомы, у к-рых внеш. часть этой оболочки не заполнена. Для атома с заполненной электронной оболочкой взаимодействие имеет характер отталкивания; вследствие этого щёлочноземельные металлы, имеющие заполненную внеш.  $s$ -оболочку из двух электронов, и инертные газы, имеющие замкнутую оболочку из шести  $p$ -электронов, не имеют О. и.

Осн. характеристикой О. и. является энергия связи электрона и захватившего его атома, наз. энергией *привлечения к электрону* и обозначаемая  $EA$  (electron affinity).  $EA$  значительно меньше потенциалов ионизации атомов (табл. а).

Методы измерения  $EA$  существует много. Наиб. информация получена методом фотоэлектронной спектроскопии — измерение порога фотораспада О. и. при операции электронов, оторванных от О. и. при облучении лазерным излучением.  $EA$  для атомов галогенов определяется по спектру излучения плазмы, к-рый даёт порог фотоприлипания электрона к атому галогена. Др. методы: метод поверхностной ионизации, анализ диссоциативного прилипания электрона к молекуле — обеспечивают точность, на два порядка худшую, чем метод фотоэлектронной спектроскопии.

Табл. 1. — Энергия связи различных атомов и электрона

	АТОМ	EA, эВ		АТОМ	EA, эВ
1	H	0,75416	37	Rb	0,4859
2	Li	0,609	39	Y	0,307
3	B	0,277	40	Zr	0,426
5	C	1,269	41	Nb	0,493
6	N	нет	42	Mo	0,746
8	O	1,46112	43	Tc	0,5
9	Na	3,399	44	Ru	1,05
11	Al	0,5479	45	Rh	1,137
14	Si	1,385	46	Pd	0,537
15	P	0,7485	47	Ag	1,302
16	S	2,07712	49	In	0,3
17	Cl	3,617	50	Sn	1,2
19	K	0,501	52	Te	1,07
21	Sc	0,188	53	I	1,9708
22	Ti	0,079	55	Cs	3,0591
23	V	0,523	57	Sr	0,47163
24	Cr	0,866	73	Ta	0,5
25	Mn	нет	74	W	0,322
26	Fe	0,163	75	Hc	0,815
27	Co	0,681	78	Rc	0,15
28	Ni	1,156	79	Ir	1,14
29	Cu	1,228	77	Pt	1,56
31	Ga	0,30	78	Pb	2,128
32	Ge	1,20	79	Al	2,3986
33	As	0,81	82	Pb	0,364
34	Sc	2,0207	83	Bi	0,946
35	Br	3,363	84	Po	1,9

Примечание. Нисуществующие отрицательные ионы ионных газов и щелочноземельных металлов не включены в таблицу.

Двухзарядные O. и. не существуют. В редких случаях O. и. могут иметь метастабильные возбужденные состояния. В табл. 2 приводятся EA для основного и возбужденного состояний тех O. и., у которых имеются возбужденные состояния.

Табл. 2. — Энергия связи в основном и возбужденном состояниях

Отрицательный ион, состояние	EA, эВ	Отрицательный ион, состояние	EA, эВ
C <sup>-</sup> ( <sup>s</sup> )	1,269	Ge <sup>-</sup> ( <sup>s</sup> )	1,2
C <sup>-</sup> ( <sup>d</sup> )	0,033	Ge <sup>-</sup> ( <sup>d</sup> )	0,4
Al <sup>-</sup> ( <sup>s</sup> )	0,548	Ge <sup>-</sup> ( <sup>d</sup> )	0,307
Al <sup>-</sup> ( <sup>d</sup> )	0,109	Y <sup>-</sup> ( <sup>d</sup> )	0,164
Si <sup>-</sup> ( <sup>s</sup> )	1,385	Pd <sup>-</sup> ( <sup>s</sup> )	0,557
Si <sup>-</sup> ( <sup>d</sup> )	0,523	Pd <sup>-</sup> ( <sup>d</sup> )	0,421
Si <sup>-</sup> ( <sup>f</sup> )	0,029	Sn <sup>-</sup> ( <sup>s</sup> )	1,2
Sc <sup>-</sup> ( <sup>d</sup> )	0,188	Sn <sup>-</sup> ( <sup>d</sup> )	0,4
Sc <sup>-</sup> ( <sup>f</sup> )	0,041		

Если O. и. содержит два возбужденных электрона, то такое состояние является автораспадным. Короткоживущие (~ 10<sup>-6</sup> с) автораспадные состояния O. и. проявляются в процессе столкновения электронов с атомами. Напр., существование автораспадного состояния O. и. азота повышает эффективность излучения низкотемпературной азотной плазмы.

Молекулярные O. и. представляют собой связанное состояние молекулы и электрона. Энергии средства неких-рых молекул к электрону приведены в табл. 3.

Табл. 3. — Энергия связи электрона с молекулой

Молекула	EA, эВ	Молекула	EA, эВ
Br <sub>2</sub>	2,6	NO <sub>2</sub>	3,1
F <sub>2</sub>	2,4	O <sub>2</sub>	2,1
SF <sub>6</sub>	3,0	SH <sub>2</sub>	1,1
I <sub>2</sub>	2,5	SO <sub>2</sub>	1,0
O <sub>3</sub>	0,44	CO <sub>2</sub>	2,8
O <sub>2</sub>	1,33	NO	3,7
S <sub>2</sub>	1,66	CO	1,2

во эффективно они образуются в электроотрицат. газах при низких темп-рах. Наличие автораспадных состояний молекулярных O. и. увеличивает эффективность коле-

Табл. 4. — Разрушение и образование отрицательных ионов

Процесс	Пример
1. Диссоциативное прилипание электрона к молекуле . . . . .	e + H <sub>2</sub> -H <sup>-</sup> + H
2. Прилипание электрона к молекуле при тройных столкновениях . . . . .	e + 2O <sub>2</sub> -O <sub>3</sub> <sup>-</sup> + O <sub>2</sub>
3. Радиат. прилипание электрона к атому и молекуле . . . . .	e + H-H <sup>-</sup> + hν
4. Хемиионизация . . . . .	Cs + MoF <sub>6</sub> -Cs <sup>-</sup> + MoF <sub>6</sub> <sup>-</sup>
5. Резонансная перезарядка . . . . .	H <sup>-</sup> + H-H + H <sup>-</sup>
6. Нерезонансная перезарядка . . . . .	O <sub>2</sub> <sup>-</sup> + O <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> <sup>-</sup>
7. Ионно-молекулярные реакции . . . . .	UF <sub>6</sub> <sup>-</sup> + BF <sub>3</sub> -UF <sub>6</sub> + BF <sub>3</sub> <sup>-</sup>
8. Образование кластерных ионов . . . . .	OH <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub> -OH <sup>-</sup> · H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>
9. Фотодиссоциация . . . . .	CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> · H <sub>2</sub> O + hν-CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O
10. Фотораспад . . . . .	H <sup>-</sup> + hν-H + e
11. Взаимная нейтрализация ионов . . . . .	H <sup>+</sup> + H <sup>-</sup> ->H
12. Рекомбинация ионов при тройных столкновениях . . . . .	NO <sup>+</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> + N <sub>2</sub> -NO + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> + N <sub>2</sub>
13. Ассоциативный распад . . . . .	O <sup>-</sup> + CO-CO <sub>2</sub> + e
14. Разрушение O. и. при столкновениях . . . . .	H <sup>-</sup> + He-H + He + e

бательного возбуждения молекул в разряде на нек. порядках.

Процессы разрушения и образования O. и. очень разнообразны (табл. 4). Эффективностью этих процессов определяется роль O. и. в разл. газопо-плазменных системах. Образование O. и. в газовом разряде резко снижает проводимость плазмы, а это приводит к возникновению неустойчивостей и структур в газовом разряде. Введение в газовый промежуток электроотрицат. газы повышает его пробивное напряжение. Существуют процессы с O. и. в атмосфере Земли, планет, звезд. Отрицат. заряд у поверхности Земли связан с процессом 2 (табл. 4). Излучение Солнца в оптич. области спектра в большей степени создается процессом 3 (табл. 4), протекающим в фотосфере Солнца.

Лит.: Смирнов Б. М., Отрицательные ионы, М., 1978; Мессин Г., Отрицательные ионы, пер. с англ., М., 1979.

Б. М. Смирнов.

**ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ КРИСТАЛЛЫ** — одноионные кристаллы, в к-рых скорость распространения обыкновенного луча света меньше, чем скорость распространения необыкновенного луча (см. *Двойное лучепреломление, Кристаллооптика*). В кристаллографии O. к. наз. также жидкие включения в кристаллах, имеющие ту же форму, что и сам кристалл.

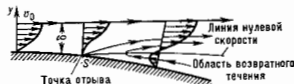
**ОТРЫВНОЕ ТЕЧЕНИЕ** — течение вязкой жидкости (газа), при к-ром следующий вдоль твердой поверхности поток жидкости отрывается от нее. Реализуют нек. типы O. т.: для гладкой поверхности отрыв с последующим присоединением оторвавшегося потока к поверхности и отрыв, в к-ром это присоединение не происходит. Кроме того, следует выделить отрыв перед и после уступа на поверхности тела, O. т. над выемкой и в донной области за телом.

Необходимое условие возникновения O. т. вязкой жидкости — повышение давления в направлении течения, т. е. убывание скорости. Типичным примером такого течения при дозвуковых скоростях потока является течение у поверхности с образующими криволинейной формы (напр., у профилей крыла при больших углах атаки, сферы), в диффузоре, канале с уступом и др. При отбегании тела криволинейной формы (рис. 1) в пределах толщины δ пограничного слоя по нормали к поверхности скорость течения убывает от значения v<sub>0</sub> на



внеш. границе слоя до  $v = 0$  на поверхности тела, а давление остаётся постоянным и равным давлению во внеш. потоке. В непосредств. близости от поверхности, где скорость течения мала, кинетич. энергия потока оказывается недостаточной для преодоления давления.

Рис. 1. Схема образования отрывного течения при обтекании дозвуковым потоком тела с криволинейной поверхностью.



повышающегося в направлении течения. В результате скорость течения становится равной нулю, а затем меняет направление на обратное. Возникновение обратного течения приводит к значит. утолщению пограничного слоя и отрыву потока от стенки. Течение в области между границей О. т. и поверхностью твёрдого тела становится вихревым. Точку  $S$  на поверхности, в к-рой  $(\partial v / \partial y)_{y=0} = 0$ , обычно принимают за точку отрыва потока.

Рассмотренная схема возникновения О. т. при достаточности больших Рейнольдса числа  $Re$  справедлива как для сжимаемой, так и для несжимаемой среды при



Рис. 2. Обтекание крыла: а — плановое; б — с образованием отрывного течения.

ламинарном или турбулентном режиме течения в пограничном слое. Так, отрыв турбулентного пограничного слоя возникает в случае, когда параметр  $\epsilon = (\delta^* / \rho v) (dp/dx)$  превышает значения  $\epsilon = 0,015$  для дозвуковых течений и  $\epsilon = 0,01$  для течений, у к-рых Маха число  $M = 3$  (здесь  $\delta^*$  — толщина вытеснения пограничного слоя,  $\rho$  — плотность газа и  $dp/dx$  — градиент давления в направлении течения  $x$ ).

Образование области О. т. существенно влияет на аэродинамич. (гидродинамич.) характеристики тел. Напр., аэродинамическое сопротивление шара, движущегося с дозвуковой скоростью, в основном определяется О. т. на поверхности задней полусферы. Турбулизация ламинарного пограничного слоя изменяет профиль скорости в пограничном слое, уменьшает зону О. т. и в нек. раз уменьшает силу аэродинамич. сопротивления шара. На верхней поверхности крыла самолёта при нек-ром угле атаки также возникает О. т. (рис. 2), область к-рого с увеличением угла атаки возрастает. При этом подъёмная сила крыла сначала проходит через макс. значение при  $\alpha_{кр}$ , а затем быстро уменьшается. Для предотвращения отрыва потока в авиац. технике на крыле устанавливают «предкрылки» и «закрылки», увеличивающие кинетич. энергию потока в пограничном слое крыла, что позволяет увеличивать  $\alpha_{кр}$  и макс. подъёмную силу крыла.

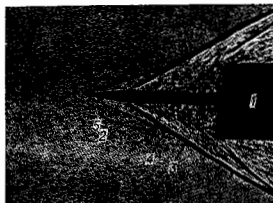
В сверхзвуковых течениях при наличии ударных волн пересечение ударной волной поверхности с вязким пограничным слоем приводит к образованию О. т., существенно влияющего на аэродинамич. характеристики тела и его тепловой режим. Для турбулентного пограничного слоя возникновение О. т. при взаимодействии с ударной волной определяется нек-рым «критич.» отношением давлений в ударной волне:  $p_2/p_1$ , где  $p_1$  — давление во внеш. потоке перед ударной волной, а  $p_2$  — давление за ней. Установлена эмпирич. зависимость

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + 0,2 \frac{k M_0^2}{(M_0^2 - 1)^{1/4}}$$

от числа Маха  $M_0$  перед ударной волной и отношения  $k = c_p/c_v$  теплоёмкостей при постоянном давлении ( $c_p$ ) и объёме ( $c_v$ ). Для ламинарного пограничного слоя величина  $p_2/p_1$  зависит, кроме того, от числа  $Re$ .

При сверхзвуковом обтекании затуплённого тела перед ним образуется отошедшая ударная волна. Если же на оси симметрии течения (рис. 3) установить тонкую иглу 2, то при пересечении отошедшей ударной волной пограничного слоя на поверхности иглы образуется область О. т. Потери энергии в ударной волне 4, образующейся при обтекании конич. области О. т. 3, меньше,

Рис. 3. Образование отрывного течения при сверхзвуковом обтекании затуплённого тела 1 с остриём 2; 3 — зона отрывного течения; 4 и 5 — ударные волны, возникающие при обтекании отрывной зоны и острия иглы.



чем в отошедшей ударной волне перед торцевой поверхностью цилиндра, соответственно меньше аэродинамич. сопротивление. Подробные исследования показали, что течение в отрывной зоне нестационарно: возникает пульсация давления большой иятенсивности, причём тепловые потоки к элементам лобовой поверхности тела увеличиваются в нек. раз.

Более сложными являются пространственные О. т., к-рые возникают при обтекании сверхзвуковым потоком тел сложной формы, напр. летат. аппарата с выступом на поверхности (рис. 4). Над поверхностью перед

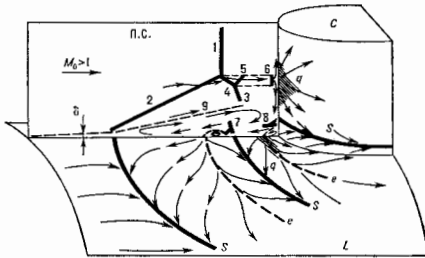


Рис. 4. Схема трёхмерного отрывного течения:  $L$  — поверхность летательного аппарата;  $C$  — цилиндрический выступ, П. С. — плоскость симметрии;  $\delta$  — толщина пограничного слоя;  $J$  —  $g$  — ударные волны;  $g$  — граница области отрывного течения;  $S$  — линии отрыва течения от поверхности летательного аппарата;  $e$  — линии растекания;  $q$  — зоны повышенных тепловых потоков (заштрихованы).

выступом возникает отошедшая ударная волна 1, пересечение к-рой с пограничным слоем вызывает образование зоны О. т. с границей 9 и ударной волны 2. В области за ударными волнами 1 и 2 образуется сложная система ударных волн 3, 4, 5, 6, 7 и 8 и линий отрыва потока газа от твёрдых поверхностей 3 и линий растекания е. Местные области сверхзвуковых течений замыкаются ударными волнами 6 и 8, за к-рыми на обтекаемой поверхности наблюдаются зоны довышенных тепловых потоков  $q$ . Образовавшееся течение нестационарно, амплитуды пульсаций давления достаточно велики, а тепловые потоки на участках поверхности  $q$  могут в десятки раз превышать тепловые потоки, соответствующие обтеканию этих поверхностей при безотрывном течении.

О. т. широко распространены в технике и наблюдаются при обтекании корпусов самолётов, кораблей, ракет, при течениях в каналах турбин, насосов, коленчатых трубопроводов и др. В большинстве случаев возникновение О. т. нежелательно, т. к. приводит к увеличению аэродинамич. сопротивления, увеличению потерь в каналах, появлению пульсаций давления и мощных акустич. возмущений. Для его предотвращения применяют отсос пограничного слоя, уддувание в пограничный слой газа с повышенной кинетич. энергией и уменьшение градиента давления в направлении течения путём подбора формы поверхности обтекаемого тела или канала, устройства направляющих лопаток.

Для анализа характерных областей О. т. можно использовать *Наве — Стокса уравнения*. Для ламинарного течения и ряда задач турбулентного течения получены численные решения. Однако сложность ур-ний и нерегулярное поведение параметров в зонах О. т. ограничивают возможность такого подхода для многих практич. задач. Для их решения обычно используют полумпирич. методики, постулирующие картину течения и использующие для турбулентных течений эмпирич. константы.

Лит.: Прандтль Л., Гидроаэромеханика, пер. с нем., М., 1930; Лойцянский Л. Г., Механика жидкости и газа, 6 изд., М., 1987; Абрамович Г. И., Прикладная газовая динамика, 4 изд., М., 1976; Зялин Д., Обрывные течения, изд. с англ., т. 1—3, М., 1975—75; Боровой В. Я., Течение газа и теплообмен в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем, М., 1983; Особенности трёхмерных отрывных течений в сверхзвуковых потоках, в кн.: Наука и человечество, М., 1986, с. 302—04.

**ОХЛАЖДЕНИЕ ПУЧКОВ** аэродинамич. частиц — уменьшение фазового объёма, занимаемого частицами — пучка в *накопителе*, за счёт к-л. механизма диссипации. (Согласно *Лившица теореме*, в механич. системе без диссипации фазовый объём сохраняется.) Охлаждение пучка позволяет значительно повысить плотность частиц в фазовом пространстве, т. е. существенно сжать пучок и уменьшить разброс скоростей частиц пучка. Охлаждение позволяет производить тит. накопление частиц путём инжекции всё новых частиц в освобождающиеся при охлаждении участки фазового пространства [4].

Скорость охлаждения частиц при наличии диссипации определяется декрементом  $\lambda$ , характеризующим скорость уменьшения элемента  $\Delta\Gamma$  шестимерного фазового объёма:

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta\Gamma} \frac{d\Delta\Gamma}{dt} = \lambda_z + \lambda_r + \lambda_\gamma = \\ = \left\langle \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial t} \right\rangle_{\mathcal{E}} + \left\langle \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mathcal{E}} \right\rangle_{\mathcal{E}} \text{ при } v \approx c, \\ = \left\langle \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mathcal{E}_k} \right\rangle_{\mathcal{E}_k} + \left\langle \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mathcal{E}_k} \right\rangle_{\mathcal{E}_k} \text{ при } v \ll c, \quad (1)$$

где  $\lambda_z$ ,  $\lambda_r$ ,  $\lambda_\gamma$  — декременты охлаждения пучка по вертикальной, радиальной и продольной степеням свободы,  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{E}_k$  — полная и кинетическая энергии частицы,  $v$  — скорость частиц,  $\mathcal{F}$  — мощность потерь энергии ( $\mathcal{F} = -Fv$ , где  $F$  — дивергентная сила торможения).

Устанавливающийся в результате охлаждения значение фазового объёма определяется балансом скорости

охлаждения и скорости нагрева из-за разл. сопутствующих процессов, как связанных с самим механизмом охлаждения, так и «посторонних» (рассеяние на атомах остаточного газа в камере, флуктуации полей накопителя и т. д.). Известно несколько методов охлаждения, отличающихся способом получения силы торможения.

**Радиационное охлаждение** связано с потерями энергии частицами на *синхротронное излучение* при движении в магн. поле. Мощность синхротронного излучения в релятивистском случае равна [2]

$$\mathcal{P}_s = \frac{2}{3} \frac{e^4}{M^2 c^3} \gamma^2 B^2, \quad (2)$$

где  $e$ ,  $M$  — заряд и масса частицы,  $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ ,  $B$  — магн. индукция. Как видно из выражения (1), в этом случае  $\lambda = 4\mathcal{P}_s/\mathcal{E}$ . Распределение полного затухания  $\lambda$  между степенями свободы, т. е. значения  $\lambda_z$ ,  $\lambda_r$ ,  $\lambda_\gamma$ , зависит от конкретной структуры магн. поля накопителя и др. факторов, определяющих взаимную связь колебаний по разл. координатам. Так, для накопителя с азимутально-симметричным магн. полем, характерным показателем спада  $n$ , декременты охлаждения равны

$$\lambda_z = \frac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{E}}, \quad \lambda_r = \frac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{E}} \frac{n}{1-n}, \quad \lambda_\gamma = \frac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{E}} \frac{3-4n}{1-n}. \quad (3)$$

В таком накопителе поперечные колебания затухают во всём диапазоне устойчивости *бетатронных колебаний*  $0 < n < 1$ , а продольные — только при  $n < 3/4$ . Для накопителя с жёсткой фокусировкой ( $|n| \gg 1$ ) и постоянных вдоль орбиты магн. полем радиальные колебания раскачиваются, т. е.  $\lambda_r < 0$ . Простейшей структурой, совмещающей высокую жёсткость фокусировки и охлаждение по всем степеням свободы, является т. н. система с разделёнными ф-циями: на поворотных участках поле однородно, а фокусировка и дефокусировка осуществляются квадруполиными линзами. В этом случае оба поперечных направления почти эквивалентны  $\lambda_z \approx \lambda_r \approx \langle \mathcal{P}_s \rangle_{\mathcal{E}}$ , а  $\lambda_\gamma = 2 \langle \mathcal{P}_s \rangle_{\mathcal{E}} / \langle \mathcal{P}_s \rangle_{\mathcal{E}}$  — средняя по орбите мощность потерь).

Установившееся значение темп-ры пучка определяется раскачкой продольных и радиальных колебаний из-за квантового характера излучения. Характерная энергия излучаемых фотонов равна  $\mathcal{E}_\gamma = \hbar\omega\gamma^3$  ( $\omega$  — частота обращения частицы). За время затухания  $\tau \sim 1/\lambda$  излучается  $N = \mathcal{P}_s \tau / \mathcal{E}$  статистически независимых фотонов, поэтому разброс энергий в пучке будет составлять  $\Delta\mathcal{E} \approx \pm \mathcal{E} \sqrt{N} \approx \pm \sqrt{\hbar e B c \gamma^3}$ . При излучении фотонов возбуждаются также радиальные бетатронные колебания (т. к. при этом меняется импульс частицы, а следовательно, и положение равновесной орбиты). Вертикальные колебания раскачиваются слабее, т. к. фотоны испускаются под малым углом  $\sim 1/\gamma$  к направлению движения (они определяются в основном связью радиального и вертикального движения).

Механизм радиац. охлаждения эффективно действует в накопителях электронов и позитронов (где он успешно используется). Для тяжёлых частиц мощность синхротронного излучения слишком мала при технических достижимых энергиях и магн. полях, и приходится прибегать к др. механизмам охлаждения.

**Электронное охлаждение** пучков тяжёлых частиц, предложенное Г. И. Будкером в 1966 и реализованное в 1974—75 [3], основано на взаимодействии охлаждаемого пучка с электронным пучком. Для этого в одном из прямолинейных промежутков накопителя сквозь пиркулирующий пучок тяжёлых частиц пропускается электронный пучок с той же ср. скоростью и малым разбросом скоростей. Благодаря кулоновскому взаимодействию между «холодными» электронами и «горячими» тяжёлыми частицами происходит интенсивный теплообмен, в результате к-рого пучок тяжёлых частиц охлажд-

дается. Декременты охлаждения в поперечном направлении равны:

$$\lambda_{z, \text{уст}} \approx 20 \frac{e^2 L_c \langle n \rangle}{M m v^3} \begin{cases} \times 1/\theta_e^3 & \text{при } \theta_i \ll \theta_e, \\ \times 1/\theta_i^3 & \text{при } \theta_e \ll \theta_i. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $\langle n \rangle$  — средняя по орбите плотность электронов,  $\theta_i, \theta_e$  — угл. разбросы тяжелых частиц и электронов,  $M, m$  — их массы,  $L_c = \ln(\rho_{\text{макс}}/\rho_{\text{мин}})$  — т. н. кулоновский логарифм ( $\rho_{\text{макс}} \gg \rho_{\text{мин}}$  — макс. и мин. прицельные параметры столкновений). Установившееся значение  $\lambda_{z, \text{уст}}$  определяется равенством темп-р электронов и тяжелых частиц:

$$\theta_{i, \text{уст}} = \theta_e \sqrt{m/M}. \quad (5)$$

Из-за большой разности масс  $m$  и  $M$  угл. разброс в пучке тяжелых частиц оказывается значительно меньше, чем в охлаждающем электронном пучке.

Применяемое для обеспечения транспортировки пучка продольное магн. поле ещё более усиливает охлаждающее действие электронного пучка: поперечное тепловое движение электронов как бы вымораживается (тяжелые частицы, протолзающие достаточно далеко от электрона, не ощущают его быстрого обращения в магн. поле по ларморовской окружности), а темп-ра продольного движения электронов часто бывает много меньше поперечной.

Эксперименты с электронным охлаждением [3] позволили охладить протонный пучок с энергией 65 МэВ до  $T \sim 1$  К за времена  $\tau \sim 50$  мс.

Ионизационное охлаждение основано на использовании диссипативного характера сил торможения при ионизации вещества. Помещая на пути пучка ряд тонких мишеней и обеспечив надлежащую связь между разл. степенями свободы, можно обеспечить затухание во всем степеням свободы. Установившиеся значения разброса скоростей обусловлены рассеянием на ядрах вещества и флуктуациями ионизац. потерь. Для протонов и антипротонов применение метода существенно ограничивается из-за их сильного взаимодействия с ядрами вещества. Практич. реализации метод пока не получил. Можно ожидать, что он окажется эффективным для мюонных пучков.

Стохастическое охлаждение, предложенное ван дер Мером (1972), основано на введении затухания с помощью систем обратной связи. Измерит. электроды определяют отклонение частицы по к-л. направлению, сигнал, пропорц. этому отклонению, усиливается и через систему обратной связи воздействует на частицу, вызывая затухание колебаний по соответствующему направлению. Напр., для уменьшения разброса по импульсам  $\Delta p_x$  измеряется радиальное отклонение частиц, к-рые пропорц.  $\Delta p_x$ . Сигнал измерит. электрода после усиления подается на ускоряющий зазор в момент прихода частицы, ускоряя или замедляя её. Колебания отд. частицы (если бы она была одна) можно было бы погасить за время периода одного оборота. Влияние соседних частиц, воздействующих на тот же электрод, увеличивает время затухания. В предельно бесконечно большого числа частиц затухания вообще нет. Для конечног. хотя и большого, числа частиц затухание имеет место, по оно невелико: его декремент ограничен неравенством

$$\lambda < \frac{\Delta \omega \cdot 2\pi f}{\omega^2 N}, \quad (6)$$

где  $\omega$  и  $\Delta \omega$  — частота обращения частиц и её разброс,  $f$  — ширина полосы пропускания системы обратной связи,  $N$  — число частиц в циркулирующем пучке. Мин. достижимая темп-ра пучка ограничена тепловыми шумами усилителя, к-рые «сгревают» пучок. Для преодоления этого ограничения можно применить большее число независимо работающих систем обратной связи. Экспериментально достигнутое время охлаждения зависело от параметров пучка и системы обратной связи и

составляло от неск. секунд до неск. часов. Метод stochastic. охлаждения особенно эффективен при малом числе частиц в больших разбросах их скоростей. Он успешно применён в ЦЕРНе в накопители антипротонов. Лит.: 1) Вудс Г. И., Скрипкин А. И., Электронное охлаждение и новые возможности в физике элементарных частиц, «УФН», 1978, т. 124, с. 561; 2) Коломенский Я. А. А., Лебедев В. А. И., Теория дипольных усилителей, М., 1962; 3) Скрипкин А. И., Пархоменчук В. В., Методы охлаждения пучков заряженных частиц, «ФЧЯ», 1981, т. 12, № 3, с. 557.

В. В. Пархоменчук

**ОЧАРОВАНИЕ** (чарм, шарм, от англ. charm — очарование) — аддитивное квантовое число  $S$ , характеризующее адроны или кварки. Частицы с ненулевым значением  $O$  наз. очарованными частицами. В кварковой модели адронов  $O$  равно разности между числом очарованных кварков ( $c$ ) и антикварков ( $\bar{c}$ ).  $O$  сохраняется в сильном и эл.-магн. взаимодействиях; в распадах очарованных адронов, происходящих за счёт слабого взаимодействия,  $O$  меняется на единицу.

В. И. Захаров

**ОЧАРОВАННЫЕ ЧАСТИЦЫ** — семейство адронов, обладающих квантовым числом очарования,  $O$ , ч. имеют в своём составе относительно тяжёлые  $c$ -кварки с электр. зарядом  $+2/3$ . Масса составляющего (конституентного)  $c$ -кварка примерно 1,5 ГэВ, так что характерная масса  $O$ . ч.  $\sim 2$  ГэВ. Как и обычные частицы,  $O$ . ч. обладают определёнными значениями странности и изотопического спина, зависящими от их кваркового состава. К кон. 80-х гг. лучше были изучены свойства очарованных мезонов, чем барионов. Самые лёгкие очарованные мезоны распадаются только в результате слабого взаимодействия и живут относительно долго, порядка  $10^{-13}$  с. Кварковая структура известных очарованных мезонов следующая:  $D^0 = (c\bar{u})$ ,  $D^+ = (c\bar{d})$ ,  $D_s^+ = (c\bar{s})$ ,  $D_s^0 = (c\bar{u})$ ,  $D_s^- = (c\bar{s})$ , где  $u, d, s, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$  — соответственно укулонные и странный кварки (антикварки). Символы  $D, D_s$  относятся к псевдоскалярным частицам. Для векторных мезонов приняты символы  $D^*, D_s^*$ . Значения масс известных очарованных мезонов таковы:

$$\begin{aligned} m(D^0) &= (1864,6 \pm 0,6) \text{ МэВ}, \\ m(D^+) &= (1869,3 \pm 0,6) \text{ МэВ}, \\ m(D^{*0}) &= (2007,2 \pm 2,1) \text{ МэВ}, \\ m(D^{*+}) &= (2010,1 \pm 0,7) \text{ МэВ}, \\ m(D_s^+) &= (1970,5 \pm 2,5) \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

Для очарованных барионов установлено существование только  $\Lambda_c^+ = (udc)$  и  $\Sigma_c^+ = (usc)$ ,  $m(\Lambda_c^+) = (2281,2 \pm 3,0) \text{ МэВ}$ ,  $m(\Sigma_c^+) = (2460 \pm 4) \text{ МэВ}$ .

В результате слабого распада  $c$ -кварка образуются преим.  $s$ -кварки. Вероятность образования нуклонных кварков подавлена как  $\sin^2 \theta_c$ , где  $\theta_c$  — Кабиббо угол. Т. о., в распадах  $D$ -мезонов и  $\Lambda_c$ -барионов образуются, как правило, странные частицы, а в распадах  $D_s$ -мезонов — частицы, в волновой ф-ции к-рых велика примесь состояния ( $s\bar{s}$ ) (прежде всего  $f$  и  $\eta$ -мезоны). Векторные  $D^*$ -мезоны распадаются на  $D$ - и  $\Delta$ -мезоны за счёт сильного взаимодействия.

Наиб. интересный факт, касающийся слабых распадов  $O$ . ч., — существ. различие полных времён жизни  $D^0$ - и  $D^+$ -мезонов:

$$\begin{aligned} \tau(D^0) &= (4,3^{+0,5}_{-0,4}) \cdot 10^{-13} \text{ с}, \\ \tau(D^+) &= (9,2^{+1,3}_{-1,0}) \cdot 10^{-13} \text{ с}. \end{aligned}$$

Это эксперим. наблюдение означает, что неверна т. н. спектрадная модель, согласно к-рой вероятности распадов  $O$ . ч. определяются исключительно амплитудами распада  $c$ -кварка, а присутствие нуклонного кварка в мезоне несущественно — последний играет роль

«наблюдателя», «спектратора». До появления эксперим. данных практически не было сомнения в справедливости спеклаторной модели.

Времена жизни  $D_s$ -мезона и  $\Lambda_c^-$ ,  $\Xi_c^+$ -барионов известны с худшей точностью:

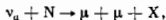
$$\tau(D_s) = (2,8_{-0,7}^{+1,6}) \cdot 10^{-13} \text{ с},$$

$$\tau(\Lambda_c^-) = (2,3_{-0,5}^{+0,8}) \cdot 10^{-13} \text{ с},$$

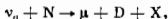
$$\tau(\Xi_c^+) = (4_{-1,5}^{+2}) \cdot 10^{-13} \text{ с}.$$

Наиб. полная информация о массах и парциальных ширинах распадов очарованных мезонов была получена в экспериментах по аннигиляции пары  $e^+e^-$  в адроны, проведенных на встречных электронно-позитронных пучках. В этих экспериментах был, в частности, открыт мезон  $\psi$  (3770) (см. *Парковий*),  $k$ -рый распадается практически всегда на пару  $D\bar{D}$ . Поскольку сечение рождения  $\psi$  (3770) при резонансной энергии велико, то встречные  $e^+e^-$ -пучки являются как бы фабрикой  $D$ -мезонов.

Однако первое, правда косвенное, указание на существование  $O_c$  было получено при изучении взаимодействий мюонных нейтрино с нуклонами; в 1974 на ускорителе в Батейни (США) были зарегистрированы т. н. димюнные события:



когда в конечном состоянии наблюдаются два мюона, а остальные частицы ( $X$ ) не идентифицируются. Димюнные события естественно было интерпретировать как рождение  $O_c$  ч., нагр.



с последующим слабым лептонным распадом  $D$ -мезона. Прямое свидетельство в пользу существования  $O_c$  ч. было получено в 1976—77 в опытах по аннигиляции  $e^+e^-$ .

Особые трудности представляет измерение времени жизни  $O_c$  ч. Для решения этой задачи была разработана спец. методика. Время жизни определялось по длине пробега в фотоэмульсии. Однако для выделения редких событий рождения  $O_c$  ч. поиск таких реакций проводился только в том случае, когда регистрировались продукты распада  $O_c$  ч. (напр., с помощью внеш. мюонного идентификатора).

Открытие  $O_c$  ч. явилось триумфом теории, в особенности кварковой модели адронов,  $k$ -рая предсказала существование новых частиц задолго до их эксперим. обнаружения. Несколько условно развитие теоретич. представлений об  $O_c$  ч. можно разбить на три этапа. В 60-х гг. существование  $O_c$  ч. обсуждалось как возможно, но необязательное расширение семейства известных тогда кварков:  $u, d, s, c$  (?). В 1970 в работе Ш. Глашоу (Sh. Glashow), Дж. Иллиопулоса (J. Illiopoulos), Л. Майяни (L. Maiani) было показано, что должны существовать относительно легкие — не тяжелее пекс. ГэВ —  $O_c$  ч. Существование нового кварка было необходимым условием самосогласованности теории слабого взаимодействия. Поэтому предсказывались и амплитуды слабого взаимодействия  $s$ -кварка, в частности преимуществ. связь  $s$ -кварков с  $s$ -кварками.

Нет никаких сомнений в том, что исходные теоретич. представления, приведшие к предсказанию  $O_c$  ч., верны. После открытия  $O_c$  ч. возникла задача более детального динамич. описания свойств  $s$ -кварков и адронов, состоящих из этих кварков. Оказалось, что относительно больш. величины массы очарованного кварка, как правило, позволяют значительно упростить теоретич. описание и тем самым выявить его осн. закономерности. В частности, мезоны, составленные из пары кварков ( $cc$ ), наиб. просто описываются в рамках

совр. теории сильного взаимодействия — *квантовой хромодинамики*. Энергия связи этих мезонов оказывается чувствительной к величине т. н. вакуумного глюонного конденсата. В рамках потенциальных моделей изучение мезонов, состоящих из очарованных кварков, позволило установить вид потенциала взаимодействия между кварками (сумма членов пропорциональных  $r$  и  $r^{-1}$ , где  $r$  — расстояние между кварками).

В то же время сравнение теоретич. предсказаний с опытом выявило несостоятельность нек-рых динамич. представлений. Выше отмечалось, что для описания слабых распадов  $O_c$  ч. оказалась непригодной спеклаторная модель. Поскольку эта модель заведомо должна быть верна для достаточно тяжелых кварков, то ясно, что масса кварка, равная 1,5 ГэВ, ещё недостаточно велика, чтобы пользоваться асимптотическими по массе кварка  $\phi$ -лами. Сечение рождения  $O_c$  ч. в столкновениях нуклонов оказалось значительно больше, чем предсказывалось теоретически. Для объяснения этих данных возникли модели, согласно  $k$ -рым волновые ф-ции обычных нуклонов содержат значит. примесь состояний с очарованными кварками ( $cc$ ). Подобные модели означают модификацию обычных представлений о нуклонах. Альтернативным объяснением является неприменимость теории возмущений к процессам рождения  $O_c$  ч.

В целом после открытия  $O_c$  ч. практически не осталось сомнения в реальности существования кварков. Лит.: Вайсберг А. О., Определение времени жизни очарованных частиц, «Природа», 1981, № 4, с. 74; Окунь Л. Е., Лептоны и нейтрино, 2 изд., М., 1980, гл. 14.; В. И. Зайгар, ОБЩЕГО ТЕОРИЯ — раздел матем. статистики, посвященный получению численных значений (оценок) измеряемых величин по результатам измерения со случайными ошибками. Осн. задачами  $O_c$  т. являются изучение распределений случайных ошибок измерений, выявление систематич. и грубых ошибок измерений (см. *Анализ данных*), разработка методов получения оценок для измеряемых величин по измерениям (см. *Наименьших квадратов метод*, *Максимального правдоподобия метод*), изучение точности самих оценок из-за погрешности измерений.

Лит.: Ли и Ян К. В., Метод наименьших квадратов и осн. основы математико-статистической теории обработки наблюдений, 2 изд., М., 1982; Статистические методы в экспериментальной физике, пер. с англ., М., 1976; Тьюки и Дж. Анализ результатов наблюдений, пер. с англ., М., 1981; Борков А. А., Математическая статистика, М., 1984. В. П. Жигорин, С. В. Каменков.



**ПАДЕ АППРОКСИМАЦИЯ** — метод суммирования расходящихся рядов с помощью рациональных  $\phi$ -ф-ций. Покрытие П. а. сформировалось в кон. 19 в. в рамках классич. теории непрерывных дробей в работах Г. Фробениуса (G. Frobenius) и А. Паде (H. Padé), определенной разложением в ряд Тейлора

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n z^n,$$

П. а.  $f^{[N, M]}(z)$  (или просто  $[N, M]$ ) наз. рациональная  $\phi$ -ция

$$f^{[N, M]}(z) = P_N(z)/Q_M(z) = f(z) + O(z^{N+M+1}), \quad (1)$$

где  $P_N(z)$  и  $Q_M(z)$  — полиномы степеней  $N$  и  $M$  соответственно. Если  $N = M$ , то  $f^{[N, N]}$  наз. диагональной П. а. Фундам. результаты о диагональных П. а. были

получены П. Л. Чибышевны, А. А. Марковым и Т. Стильсом (Th. Stieltjes) в терминах непрерывных дробей. Вычисления П. а.  $f(N, M)$  сводится к решению системы линейных ур-ний, коэф. которых выражаются через коэф.  $f_n$ .

П. а. (1) обладает след. свойствами. 1) При фиксированных  $N$  и  $M$   $f(N, M)$  единственна. 2) Класс ф-ций, к-рый можно аппроксимировать методом П. а., включает в себя ф-ции, имеющие особенности в виде полюсов; это отличает П. а. от аппроксимации с помощью полиномов, несправедливой в окрестности полюса. 3) Поскольку П. а. осуществляет гладкое *аналитическое продолжение* известных членов ряда Тейлора, начиная с  $N + M + 1$ , она имеет смысл, если члены ряда медленно меняются с ростом  $n$ . Это всегда справедливо, если ряд имеет ненулевой радиус сходимости. 4) Для любой мероморфной ф-ции  $f(z)$  и для любых  $R > 0$ ,  $\varepsilon > 0$  и  $\delta > 0$  существует номер  $N$ , такой, что при  $n \geq N$  диагональные П. а.  $[n, n]$  удовлетворяют условию

$$|f(z) - f^{[n, n]}(z)| < \varepsilon$$

при  $|z| \leq R$  за исключением области  $D_n$  меры менее  $\delta$ . Это свойство обычно называют сходимостью по мере. Тот же результат справедлив и для  $[n+k, n]$  П. а. 5) Недостаток П. а. является то, что в нек-рых случаях ф-ция  $f(N, M)$  при фиксированных  $N$  и  $M$  может иметь особенности, отличные от особенностей ф-ции  $f(z)$ . В этом смысле наилучшее описание обычно дают диагональные П. а.

Метод П. а. применяют в разл. физ. задачах для улучшения свойств решений, полученных приближенными методами. Метод позволяет ускорить сходимость ряда теории возмущений по малому параметру, аналитически продолжить полученное решение за пределы круга сходимости исходного ряда, осуществить численное решение ур-ний, в этом случае П. а. имеет преимущество по сравнению с методом Ньютона.

Метод П. а. можно также применить для суммирования асимптотич. разложений, имеющих нулевой радиус сходимости. В этом случае П. а. следует использовать в комбинации с др. методами, улучшающими сходимость исходного ряда, напр. с методом преобразования Бореля. Разработано много алгоритмов для машинного вычисления П. а., что существенно для разл. приложений. Метод П. а. применяют к задачам статистич. механики, физики твердого тела, физики элементарных частиц, теории критич. явлений, квантовой механики — ко всем задачам, где имеется разложение по малому параметру.

Лит.: Вейкер Дж. (мл.), Грейвс-Моррис П., Аппроксимация Паде, пер. с англ., М., 1986. Д. И. Назаров.

**ПАДЕНИЕ ТЕЛА** — движение тел при отсутствии у них нач. скорости, обусловленное притяжением Земли. Если П. т. осуществляется с небольшой по сравнению с радиусом Земли высотой, то действующую на тело силу тяжести  $P = mg$ , представляющую собой сумму силы притяжения и центробежной силы инерции (учитываемой в первом приближении влияние вращения Земли), можно на данной географич. широте считать постоянной. При этих предположениях движение тела будет происходить под действием пост. силы тяжести и переменной силы сопротивления среды (воздуха или воды). В нек-рых случаях сопротивлением среды можно пренебречь; при этом предположении движение тела пад. с в о б о д н ы м падением и представляет собой прямолинейное равнономерно ускоренное поступат. движение. Ф-лы свободного П. т. характерны тем, что они не содержат к-л. коэффициентов, зависящих от масс тела и его формы.

В практике пренебрегать действием сопротивления среды нельзя. Если принять, что гл. вектор сил сопротивления  $R = kSv^2$ , где  $v$  — скорость центра масс тела,  $S$  — площадь наиб. непоперного сечения тела плоскостью, перпендикулярной к направлению скорости  $v$ , а  $k$  — численный коэф., зависящий от формы

тела и плотности среды, то для скорости центра масс тела в зависимости от пройденного им расстояния  $h$  получается ф-ла

$$v = a\sqrt{1 - \exp(-2gh/a^2)}, \quad (*)$$

где  $a = \sqrt{P/kS}$ . Из ф-лы (\*) следует, что с возрастанием  $h$  скорость падения стремится к постоянной  $a$ , наз. предельной скоростью падения. Если  $k$  и  $S$  достаточно велики, то скорость падения приближается к предельной скорости на сравнительно коротких расстояниях от точки начала падения.

При П. т. с больших высот необходимо принимать во внимание влияние вращения Земли (см. *Кориолиса сила инерции*), вызывающее отклонение падающего тела от вертикали, а также изменение силы притяжения с расстоянием тела от поверхности Земли. В первом приближении отклонение тела направлено к востоку; величина этого отклонения при свободном падении равна  $y = 1/2 \omega^2 g t^2 \cos \varphi$ , где  $\omega$  — угл. скорость Земли,  $\varphi$  — широта,  $t$  — время падения; во втором приближении получается дополнит. отклонение к югу:  $x = 1/2 \omega^2 g t^4 \sin \varphi \cos \varphi$ .

При учёте изменения силы притяжения, к-рая обратно пропорц. квадрату расстояния от центра Земли, для скорости свободного падения имеет место ф-ла

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{(1 + h_0/R)[1 + (h_0 - h)/R]}}$$

где  $h_0$  — высота падения (считая от поверхности Земли),  $R$  — радиус Земли.

**ПАЙЕРЛСА ПЕРЕХОД** — структурный фазовый переход металла — диэлектрик в *квазиодномерных соединениях*, при к-ром формируются периодич. в пространстве смещения янов из их положения равновесия в металл. фазе. Смещения сопровождаются перераспределением электронной плотности (см. *Волны зарядовой плотности* 1, 3). В квазиодномерных кристаллах с цепочечной структурой янов (или молекул) электроны проводимости свободно двигаются вдоль цепочек из-за хорошего перекрытия валовых электронных ф-ций соседних атомов в цепочке, но движение электронов между цепочками затруднено [4].

Для одной цепочки «поверхости» Ферми электронов проводимости состоит из двух точек в пространстве одномерных волновых векторов  $k = \pm k_F$  (дуг — фермиевский импульс). Эти точки совмещаются друг с другом при переносе на величину  $2k_F$ . Поэтому смещения янов с одномерным волновым вектором  $2k_F$  (пайерловские смещения) создают диэлектрич. щель на поверхности Ферми (в точках  $\pm k_F$ ), к-рая приводит к понижению энергий электронов вблизи щели и к понижению полной энергии электронной системы (рис. 1). Это понижение и является причиной П. п.

П. п. проявляется в падении проводимости и парамагн. восприимчивости электронов при охлаждении кристаллов ниже точки перехода.

Из-за движения электронов между цепочками, а также из-за электростатич. взаимодействия волн зарядовой плотности на разных цепочках пайерловские смещения ниже точки фазового перехода упорядочиваются трёхмерным образом. Поверхность Ферми в этом случае состоит из двух участков вблизи точек  $\pm k_F$ . Эти участки совмещаются при параллельном переносе на трёхмерный вектор  $Q$ , компонента к-рого вдоль цепочек равна  $2k_F$  (рис. 2). Наиб. часто волны зарядовой плотности

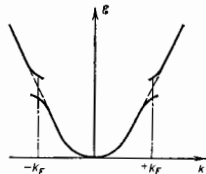


Рис. 1. Энергетический спектр электронов в пайерловском диэлектрике (сплошные линии) и в металлической фазе (пунктир).

соседних цепочек находится в противофазе. Однако компонента вектора  $Q$  вдоль цепочек всегда близка к  $2k_F$ , причём величина  $2k_F$  пропорц. плотности электронов в проводимости на цепочке. Связь вектора  $Q$  с плотностью электронов в проводимости на цепочках выявляет электронную природу П. п.

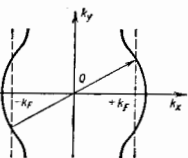


Рис. 2. Поверхность Ферми в квазиодномерном металле. Пунктир показывает поверхность Ферми без учёта движения электронов между цепочками; переход на вектор  $Q$  смещает правую и левую части поверхности Ферми. Ось  $x$  направлена вдоль цепочек.

Для пайерсовского диэлектрика характерны нелинейные эффекты в зависимости электрич. тока  $I$  от приложенного электрич. поля. Для трихалькогенидов переходных металлов эти эффекты проявляются в полях  $E \approx E_c$ , где  $E_c$  — пороговое поле, мин. значение  $k$ -рога  $\approx 0,01-1$  В/см. Возле  $E_c$  с ростом  $E$  величина  $dE/dI$  падает и появляется периодически осциллирующая во времени компонента электрич. тока. Интерпретация этого эффекта основана на концепции флексионской коллективной моды, спейдической для состояния с волной зарядовой плотности.

Лит.: 1) Пайерлс Р., Квантовая теория твёрдых тел, пер. с англ., М., 1966, гл. 5, § 3; 2) Булаевский Л. П., Структурный (пайерсовский) переход в квазиодномерных кристаллах, «УФН», 1975, т. 115, с. 263; 3) Jerome D., Seelig H. J., Organic conductors and superconductors, Adv. Phys., 1982, т. 20; 4) Schlegel O. et al. F., Electrical and magnetic properties of linear conducting chains, Phys. Stat. Solidi, 1972, т. 12, p. 9. Л. Н. Булаевский.

**ПАЛЕОМАГНИТОЛОГИЯ** — учение о палеомагнетизме, т. е. о магн. поле Земли в прошлые геологич. эпохи. Вместе с петромагнитологией, изучающей магнетизм горных пород, П. возникла и развивается на стыке геологии, геофизики, физики, химии.

П. рассматривает две задачи: прямую — изучение поведения в пространстве и времени древнего геомгн. поля (ГП)  $H_{др}$  на основе информации об остаточной намагниченности  $M_n$  горных пород, а также исследование закономерностей захрепления и сохранения данных о древнем ГП в  $M_n$ , и обратную — определение на основе палеомагн. данных условий образования пород, уточнение георолевологии и стратиграфии (строения и эволюции Земли), решение ряда проблем структурной геологии, палеогеографии и т. д.

В основе П. лежат следующие три положения: 1) вектор  $M_n$  горных пород пропорц. вектору ГП  $H_{др}$  времени и места образования породы, т. е.

$$M_n = kH_{др}. \quad (1)$$

Выполнение равенства (1) позволяет по измеренным величине и направлению  $M_n$  вычислить величину и направление древнего ГП; 2) первичная остаточная намагниченность  $M_n^0$  сохраняется (хотя бы частично) в породе к моменту измерения и может быть выделена из суммарной (многокомпонентной)  $M_n$ , при этом любая надёжно датированная компонента  $M_n$  приобретает смысл первичной; 3) осреднённое за интервал времени более  $10^6$  лет древнее ГП является дипольным (см. *Земной магнетизм*).

Образование стабильной остаточной намагниченности  $M_n$ , способной сохраниться в горных породах до наших дней, определяется условиями (темп.-пр., давлением, хим. реакциями и др.), при к-рых происходили кристаллизация минералов и формирование горных пород. Наб. информация для П. термостабильная и намагнитенность  $M_n$ , к-рая образуется при охлаждении ферромагн. материала от темп-р  $T$  выше точки Кюри  $T_C$  до нек-рой темп-ры  $T < T_C$  в пост. магн. поле.  $M_n$  приобретает, напр.,

зверженные горные породы при остывании продуктов извержения на поверхности Земли в ГП места и времени извержения. В области малых полей, каковым является и ГП,  $M_n$  удовлетворяет соотношению (1) и зависит от интервала темп-р, в к-ром она возникла. В практике палео- и петромагн. исследований этот интервал обычно соответствует интервалу от  $T_C$  до комнатной темп-ры.

Др. вид  $M_n$ , имеющий также большое значение в П., — ориентационная остаточная намагнитенность  $M_{ro}$ , образовавшаяся при осаждении в пост. магн. поле взвешенных в жидкости или газе свободно ориентирующихся ферромагн. частиц. Магн. моменты этих частиц преим. ориентируются по направлению внеш. магн. поля.  $M_{ro}$  приобретает осадочные горные породы, образованные в эпохи осадконакопления. В малых полях  $M_{ro}$  также удовлетворяет зависимости (1), однако палеомагн. исследованиями установлено, что  $M_{ro}$  часто даёт неверную информацию о направлении древнего ГП. Поэтому при палеомагн. исследованиях осадочных горных пород необходимо учитывать влияние на  $M_{ro}$  процессов уплотнения частиц и перероста их течениями.

Нередко как изверженные, так и осадочные породы могут частично или полностью терять первичную информацию о ГП, существовавшей во время их образования, в результате хим. и др. преобразований ферромагн. минералов при нек-рой темп-ре ниже  $T_C$  в более позднем ГП. При этом образуется химически новая остаточная и намагнитенность  $M_{re}$ , свойства к-рой сложны и ещё до конца не изучены. В палеомагн. исследованиях  $M_{re}$  зачастую выступает в роли вторичной, паразитной намагниченности, однако в нек-рых случаях она приобретает смысл первичной и сама несёт информацию о ГП и физ.-хим. условиях в эпоху их образования.

В качестве вторичной намагниченности в горных породах почти всегда присутствует в знач. остаточная и намагнитенность  $M_{re}$ , возникающая при длительном изотермич. выдержании пост. ГП в эпохи после образования породы. Наиб. эффективным способом разрушения  $M_{re}$  и устранения её влияния на первичную палеомагн. информацию является т. н. температурная чистка (нагрев и охлаждение в нулевом поле до  $T < T_C$ ). Эксперименты показали, что  $M_{re}$  пропорциональна логарифму времени действия поля. Знание временной зависимости  $M_{re}$  позволяет использовать  $M_{re}$  для оценки абсолютного возраста горных пород.

Палеомагн. исследования включают три этапа: 1) выбор объекта исследования — геологич. тела или неск. тел, оптимально удовлетворяющих условиям поставленной задачи, определение их ориентации в древности и в наше время, отбор образцов слагающих эти тела пород; 2) выделение  $M_n$  из суммарной намагниченности  $M_n$  образца и определение её природы и степени сохранности (для ряда задач используются и др. компоненты  $M_n$ ); 3) измерение величины и направления  $M_n^0$ .

Конечная цель палеомагн. исследований — абсолютное достоверное определение модуля и направления ГП в точке отбора, привязанное ко времени нек-рого геологич. события (прямая задача П.) — не всегда достижима, поскольку ещё нет надёжных способов однозначного определения элементов древнего ГП и датировки геологич. событий. Поэтому результаты палеомагн. исследований характеризуются той или иной степенью надёжности (достоверности). Наб. надёжный вывод П. заключается в том, что магн. поле Земли в прошлом не оставалось постоянным ни по величине, ни по направлению, причём за геологич. время неоднократно происходила смена полярности ГП (инверсии). Обнаружение и датировка геомгн. инверсий — одно из важнейших достижений П. Установлено, что инверсии, как правило, происходят на фоне пониженной напря-

жённости ГП, при этом само поле, вероятно, имеет дипольный, а мультиполюльный характер. Продолжительность инверсий  $\sim 10^4 - 10^5$  лет. От рифа до кайнозоя обнаружено неск. сотен инверсий (рис. 1). Будучи явлением глобального масштаба, геомаг. инверсии используются для глобальной возрастной корреляции геолог. событий в истории Земли. Явление геомаг. инверсий лежит в основе магнитостратиграфии, построения временной шкалы изменений полярности ГП. Возникновение инверсий находит своё объяснение в теории генерации ГП (см. *Гидромагнитное динамо*). Необходимым условием установления факта инверсии является обнаружение в разных регионах Земли различных по генезису и составу, но одновозрастных пород с  $M_n$ , направленной противоположно ГП близлежащих энох. Однако в нек-рых случаях возможно самообращение  $M_n$  — самопроизвольное намагничивание горных пород противоположно направлению намагничивающего поля, что мешает выявлению инверсий. Самообращение  $M_n$  связано со сложными физико-химическими процессами в ферромагнитных зёрнах горных пород.

Наряду с инверсиями в истории ГП установлены также кратковременные (менее  $10^4$  лет) отклонения геомаг. полюса от своего прямого или обратного положения на угол менее  $180^\circ$  (обычно  $60^\circ - 120^\circ$ ). Такие от-

клонения (э к с у р с я) изучены гораздо хуже инверсий, поскольку выделение экскурсов чрезвычайно осложняется из-за их кратковременности.

П. установила также, что в древние энохи ср. положение геомаг. полюсов на длит. отрезках времени значительно отличалось от современных. Положения палеомаг. полюсов вычисляют, исходя из предположения о дипольном характере ГП. Древний магн. меридиан находят по направлению горизонтальной составляющей  $M_n$ , положение древнего магн. полюса на этом меридиане определяют по ф-ле

$$2\lg\varphi = \lg I, \quad (2)$$

где  $\varphi$  — древняя геомаг. широта места отбора образцов,  $I$  — наклонение  $M_n$  (угол между  $M_n$  и горизонтальной плоскостью). Согласно теории гидромаг. динамо, положение геомаг. полюса прибли. совпадает с положением географ. полюса. Поэтому изменение положения древнего геомаг. полюса связывают с перемещением континентов. Собств. движения палеомаг. полюса, по имеющимся немногочисл. данным, не превышают  $7^\circ$ . По найденным для разных континентов кажущимся траекториям движения палеомаг. полюсов осуществляют палеотектонич. реконструкцию, т.е. определение относит. и абс. перемещений континентов и литосферных блоков, а также оценивают возраст горных пород.

К важным достижениям П. относится открытие периодич. изменений древнего ГП — палеоэпох в а р и а ц и я, обладающих дискретным и устойчивым во времени спектром. Выделены след. периоды вековых вариаций:  $1.5 \cdot 10^3$ ;  $9 \cdot 10^3$ ;  $3 \cdot 10^4$ ;  $2 \cdot 10^5$ ;  $1.2 \cdot 10^6$ ;  $900, 600, 350, 180, 120, 60, 20$  лет (значения примерные). Значение спектра палеоэпох вариаций позволяет осуществлять возрастную корреляцию геолог. образований в пределах зон одинаковой геомаг. полярности.

Амплитуда вековых вариаций в древние энохи не отличалась от амплитуд совр. вариаций и резко увеличивалась в эпохи, близкие к инверсиям. В разные энохи наблюдалась как западный, так и восточный дрейф ГП. Величину напряжённости  $H_{др}$  древнего ГП определить гораздо сложнее, чем направление, поскольку значение намагниченности сохраняется хуже, чем её направление. При определении  $H_{др}$  на основании (4) сравнивается величина  $M_n$  горной породы (или одной из её компонент) с искусственно созданными на том же материале величинами остаточных намагниченностей ( $M_{11}, M_{10}$  и др.) в известном магн. поле. При этом считается, что величина и стабильность намагниченности не зависят от длительности её образования. В П. существует более 40 методов оценки  $H_{др}$ , многие из к-рых ещё далеко не совершенны. Поэтому часто наблюдается несоответствие палеомаг. данных о величине  $H_{др}$ , полученных разными методами, особенно для древних энох (рис. 2). Наиб. достоверно установлены вариации палеонапряжённости с периодом ок.  $10^4$  лет.

Для выявления палеомаг. информации в П. стали оперировать не просто вектором  $M_n$ , а совокупностью магн. свойств образца горной породы, наз.  $m$  и  $n$  и т.п.  $m$  состоит из  $m$  и  $n$ , в к-рую вектор  $M_n$  входит как гл. составная часть. В П. магн. состояние является источником информации не только о древнем ГП, но и об условиях образования и последующего преобразования ферромаг. минералов и горных пород. Формирование устойчивого магн. состояния горных пород происходит под воздействием не только ГП, но и др.

$H_{др}/H_0$

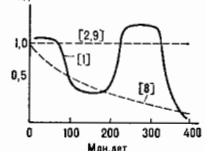


Рис. 2. Изменения напряжённости древнего геомагнитного поля за последние 400 млн. лет (по данным разных авторов).

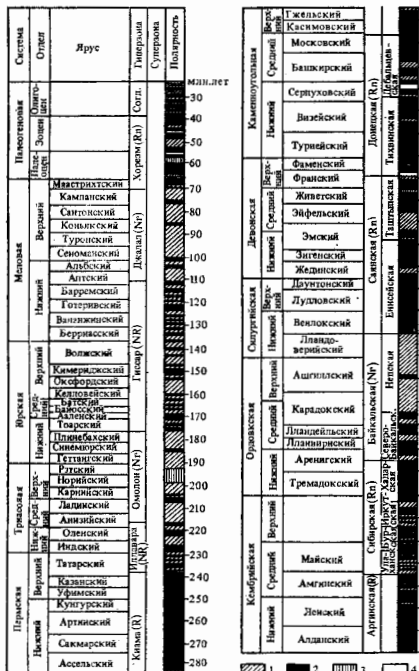


Рис. 1. Магнитостратиграфическая шкала докембрийской части фанерозоя СССР. Интервалы полярности: 1 — прямой, 2 — обратный, 3 — частое чередование, 4 — неисследованные.

воздействий, напр. давления и темп-ры. Используя «память» магн. состояния об условиях своего образования и последующих внеш. воздействий, удалось существенно расширить информативность методов П. В. П. уже существуют простые и быстрые способы оценки темп-ры кристаллизации, перекристаллизации, намагничивания, вторичного прогресса минералов по их естеств. магн. состоянию (магнитные геотермометры). Что касается магн. геобарометров, определяющих воздействия давления на магн. состояние, то они пока не нашли должного развития в П.

Магн. «память» — это лишь часть физ. памяти минералов, и изучение её целесообразно проводить в комплексе с др. видами «памяти» (электрич., механич., хим. и др.). Использование в П. других (немагнитных) видов «памяти» позволило бы существенно повысить достоверность палеомагн. данных.

Лит.: 1) Большаков А. С., Солодовников Г. М., Напряженность геомагнитного поля в последние 400 млн. лет, «ДАН СССР», 1981, т. 260, № 6, с. 1340; 2) Борисова Г. П., Илюшова Л. Е., о возможности статистических оценок палеомагнитности геомагнитного поля, «Изв. АН СССР, Физика Земли», 1985, № 7, с. 71; 3) Брагинский С. И., Геомагнитное динамо, там же, 1978, № 9, с. 74; 4) Петрова Г. Н., Лабораторные методы при палеомагнитных исследованиях, «Геомагнитные исследования», 1977, № 19, с. 46; 5) Петровский Д. М., Петромагнетизм и палеомагнетизм, М., 1985; 6) Палеомагнитология, Л., 1982; 7) Яковлев В. М., Земной магнетизм, Л., 1978; 8) Smith P. J., Ancient geomagnetic field intensities..., «Geophys. J. Roy. Astron. Soc.», 1988, v. 18, p. 457; 9) Kono M., Intensities of the Earth's magnetic field about 60 m. y. ago determined from the Decan trap basalts, India, «J. Geophys. Res.», 1974, v. 79, № 8, p. 1135. Г. П. Марков.

ПАЛЛАДИЙ (Palladium), Pd, — хим. элемент VIII группы периодич. системы Менделеева, ат. номер 46, ат. масса 106,42, входит в платиновую группу *благородных металлов*. Природный Pd состоит из смеси 6 стабильных изотопов:  $^{102}\text{Pd}$ ,  $^{104}\text{Pd}$  —  $^{108}\text{Pd}$ ,  $^{109}\text{Pd}$  и  $^{110}\text{Pd}$ ; преобладают  $^{106}\text{Pd}$  (27,33%) и  $^{108}\text{Pd}$  (26,46%), наименее распространён  $^{102}\text{Pd}$  (1,020%). Металлич. радиус 0,137 нм, радиус иона  $\text{Pd}^{4+}$  0,064 нм. Электронная конфигурация внеш. оболочек  $4s^2 4p^6 4d^{10}$ . Энергии последоват. ионизации 8,33, 19,4 и 33,4 эВ. Значение электроотрицательности 1,8.

В свободном виде серебристо-белый металл, решётка кубич. гранцентрированная, постоянная решётки  $a = 0,38824$  нм. Плотность 12,02 г/см<sup>3</sup> (по др. данным, 12,16 г/см<sup>3</sup>),  $t_{\text{пл}} = 1554^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{кип}}$  ок. 2900°C. Теплота плавления 16,71 кДж/моль, теплота испарения 353 кДж/моль, уд. теплоёмкость  $c_p = 25,8$  Дж/(моль·К). Темп-ра Дебая 275 К. Работа выхода электрона 4,8 эВ. Термич. коэф. линейного расширения 12,5·10<sup>-6</sup> К<sup>-1</sup> (при 300 К). Уд. электрич. сопротивление 0,102 мОм·м (при 273 К), термич. коэф. электрич. сопротивления 3,79·10<sup>-6</sup> К<sup>-1</sup> (при 273—373 К). Теплоёмкость 76,2 Вт/м·К (при 293 К). Твёрдость по Бринеллю 300—400 МПа. Модуль упругости 113 ГПа, модуль сдвига 49 ГПа (при 20°C).

В соединениях проявляет степень окисления +2, реже +4. На воздухе устойчив. При 20°C один объём П. способен обратимо поглощать до 900 объёмов водорода, поэтому П. катализирует мн. реакции гидрирования, он служит также (в чистом виде и в виде сплавов) катализатором различных др. хим. процессов. П. применяют для приготовления электр. контактов. Тонкие (толщиной до 0,1 мкм) слои П. используют для получения сверхчистого водорода. П. входит в состав сплавов для изготовления резисторов и терморез. Искусств.  $^{106}\text{Pd}$  (электронный захват,  $T_{1/2} = 17,0$  сут) служит в качестве радиоактивного индикатора.

С. С. Бердников.

**ПАМЯТИ УСТРОЙСТВА** (запоминающая устройства) — в вычисл. технике (см. *Электронная вычислительная машина*) устройства для записи, хранения и воспроизведения информации. В качестве носителя информации может выступать физ. сигнал, распространяющийся в среде, или сама среда; при этом информация задается в виде параметров сигнала или параметров состояния среды соответственно. Напр., в случае магн. П.

у. носителем является магн. среда, а параметром состояния — намагниченность.

Процесс записи информации осуществляется при воздействии сигнала на носитель, изменяющее состояние этого носителя. Обратный процесс — считывание информации — состоит в изменении параметров считываемого сигнала или в его генерации под действием носителя. Физические способы записи, хранения и считывания информации могут быть различными: электрическими, магнитными, оптическими, акустическими и др.

Наим. участок среды — носителя информации, позволяющий хранить единицу информации, наз. элементом памяти (ЭП). Если он может принимать и сохранять два стабильных состояния, элемент является бистабильным, если у стабильных состояний —  $q$  — стабильным. Число бит информации  $n$ , к-рое может хранить  $q$ -стабильный элемент, определяется как  $n = \ln_q q$ . Напр., регистр, содержащий 4 бистабильных ЭП, имеет 16 стабильных состояний и позволяет хранить 4 бита информации. В вычисл. технике информация хранится (записывается, считывается) блоками по  $l$  бит, наз. словами или ячейками памяти. Примером трёхстабильного ЭП может служить магн. ЭП на ферритовом кольце (см. ниже). Он имеет три состояния намагниченности: положительную, отрицательную и нулевую. П. у. состоит из набора последовательно промаркированных слов. Запись (считывание) отд. слова осуществляется по его номеру, наз. адресом. В ряде П. у. можно обращаться также к отд. байтам внутри слова. Число  $l$ кратно 8, напр. при  $n = 8$  слово содержит 8 бит (1 байт), а при  $n = 16$  оно содержит 16 бит (2 байта).

П. у. характеризуется временем записи (считывания) информации, характерным временем её сохранения, плотностью размещения информации на носителе, информац. ёмкостью, энергией, необходимой для переключения ЭП, и т. п. Время записи (считывания) информации определяется временем переключения ЭП на одно устойчивое состояние и другое при записи (считывании) информации, характерное время сохранения информации носителем — физ. принципом её хранения. Напр., время сохранения заряда на конденсаторе в полупроводниковом П. у. существенно зависит от величины заряда и скорости его релаксации (тока утечки). Для увеличения времени сохранения информации она может периодически перезаряжаться (регенерироваться). Период регенерации должен быть меньше характерного времени сохранения информации в носителе. Плотность размещения информации определяется характерными размерами ЭП и измеряется отношением числа бит, сохраняемых носителем, к его площади (или объёму для объёмных носителей). Информац. ёмкость П. у. определяется произведением полного числа ЭП в П. у. на число бит в ЭП.

Элементы памяти на макрооптических структурных изменениях (нарушениях формы) носителя. Хранение информации осуществляется в таких структурных изменениях (нарушениях) поверхности носителя, как изменение рельефа поверхности, степень её разупорядоченности (кристаллич. или аморфная структура), механич. перфорация носителя, прожигание микрострелки в непрозрачной подложке (абляция), различного рода микровдавления из-за термического локального нагрева и др. Примерами носителей для таких ЭП являются перфкарта, перфолента, грампластинка, оптический диск.

Запись информации производится при помощи механич. нарушения носителя (пробивка отверстий в перфкарте или перфоленте), абляционным способом, термооптически или термоэлектрически (используются для записи информация на оптич. диск; см. ниже) и др., считывание информации — механич., эл.-механич. или оптич. методами.

Примером совр. П. у., использующим ЭП описанного типа, является оптич. дисковое П. у. (рис. 1). Запись информации (рис. 1, а) осуществляется лазерным лучом, вызывающим абляцию носителя  $l$ , путём создания



на нём вздутый при локальном нагреве (т. е. при локальном изменении коэф. отражения) или переводом носителя 4 из кристаллич. фазы в аморфную и наоборот [1]. Считывание информации производится тем же лазерным пучком (но меньшей интенсивности), что и запись, а разделение падающего и отражённого пучков осуществляется по поляризации благодаря фазовой пла-

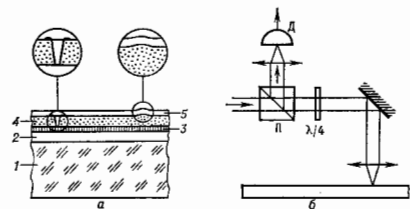


Рис. 1. Схема оптического диска (а) и устройства записи (считывания) информации (б): 1 — стелсый слой; 2 — отражающий зеркальный слой; 3 — прозрачный диэлектрик с низкой теплопроводностью; 4 — информационный носитель; 5 — прозрачный защитный слой; П — поляризационный оптический светоделитель; Д — детектор.

стинке  $\lambda/4$  и поляризац. светоделителю П. Из-за различия коэф. отражения ЭП, подвергнутых и не подвергнутых действию лазерного излучения, каждый ЭП имеет 2 стабильных состояния и позволяет хранить 1 бит информации.

Мин. размер ЭП определяется диаметром области фокусировки записывающего лазерного пучка и составляет 0,4–1 мкм, что позволяет хранить на стандартном оптич. диске (диам. 30,5 см) 12–32 Гбит. Время записи (считывания) информации для оптич. диска составляет от 100 до 500 мс [1].

Магнитные элементы памяти [2]. Принцип действия основан на эффекте сохранения намагниченности носителя (остаточная намагниченность) после выключения внеш. магн. поля (рис. 2, а). Разлагая магн. ЭП, используются намагниченность всего объёма элемента (ферритовые кольца, рис. 2, б) и намагниченность макроскопич. участков носителя. На рис. 2, в приведены

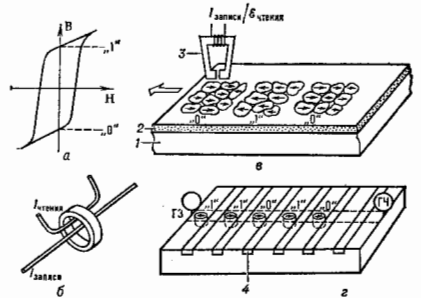


Рис. 2. Кривая намагничивания (а) и элементы магнитной памяти на ферритовом кольце (б), движущемся магнитном носителе (в), цилиндрическом магнитном домене (г): 1 — подложка; 2 — магнитный носитель; 3 — головка записи/чтения информации; 4 — система проводников; ГЧ — головка записи и считывания.

дена схема ЭП, размещённых на подвижном магн. носителе (магн. лента, диск). Запись (считывание) информации осуществляется при взаимном перемещении носи-

теля и головки записи (считывания). Запись происходит при подаче на головку тока записи  $I_{\text{записи}}$ , создающего ток записи в зазоре головки и на магн. носителе, а считывание информации — путём съёма ЭДС, индуцированной в головке при перемещении намагниченного участка мимо зазора.

Др. типом магн. ЭП является устройство на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД) [2] (рис. 2, в). В нём осуществляется перемещение ЦМД по направлению от головки записи к головке чтения при приложении внешнего продольного поля, создаваемого путём коммутации тока системой проводников 4 в подложке.

Мин. размер магн. ЭП составляет от  $\approx 5$  мкм для магн. ленты (диска) до  $\approx 1$  мкм для ЦМД. Плотность записи информации с учётом технол. особенностей изготовления магн. П. у. составляет для магн. ленты  $\approx 600$  бит/мм<sup>2</sup>, для магн. диска  $\sim 10^4$  бит/мм<sup>2</sup> для П. у. на ЦМД может достигать  $\sim 10^8$  бит/мм<sup>2</sup> [2]. Характерное время сохранения информации в магн. П. у. определяется естественным размагничиванием носителя (практически от неск. лет до неск. десятков лет). Время записи (считывания) в таких П. у. ограничено не временем перемагничивания, а, как правило, скоростью движения носителя, электронными схемами управления П. у. и т. п. Достижимые скорости считывания информации лежат в диапазоне от 1–100 кбит/с для магн. ленты до 1 Мбит/с для П. у. на ЦМД и  $\approx 10$  Мбит/с для магн. диска.

Достоинствами магн. П. у. являются их энергонезависимость (способность сохранять информацию при отключении питания) при хранении информации и высокая радиацион. стойкость.

Электрические элементы памяти [3–5]. В основе работы лежат разл. эффекты перераспределения в ЭП тока, заряда или напряжения. Физ. принципы работы ЭП и технологии изготовления П. у. определяют минимально достижимую сверхлю переключенную ЭП, что в конечном счёте определяет плотность размещения информации на носителе. Наиб. разработанными и широко распространёнными П. у., использующими электр. ЭП, являются полупроводниковые П. у. К числу осн. разновидностей полупроводниковых П. у. относятся постоянные запоминающие устройства (ПЗУ — аббревиатура, используемая преим. для устройств микроэлектроники), программируемые ПЗУ (ППЗУ), стирае-

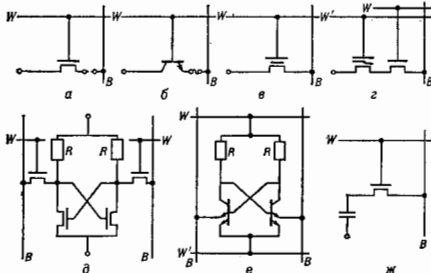


Рис. 3. Схемы различных полупроводниковых элементов памяти: а — МДП ПЗУ; б — биполярное ПЗУ; в — МДП СПЗУ; г — МДП ЭСПЗУ; д — МДП СЗУПВ с нагрузкой R; е — биполярное СЗУПВ с нагрузкой R; ж — МДП ДЗУПВ.

мые ПЗУ (СПЗУ), ПЗУ с электр. стиранием (ЭСПЗУ), статич. и динамич. П. у. с произвольной выборкой (СЗУПВ и ДЗУПВ). Принципиальные схемы ЭП П. у. переключенных типов приведены на рис. 3. Физ. механизмы работы полупроводниковых П. у. даны в табл.

## Физические механизмы работы полупроводниковых устройств памяти

Тип устройства памяти	Запоминающие заряды	Метод записи	Метод считывания	Примечание
ПЗУ	Не производится	Формирование (разрушение) перемычек при инжекции	Нарушающие «опрос» перемычек	—
СПЗУ	На плавающем затворе транзистора ЭП	Инжекция на плавающий затвор триггера	Считывание (без инжекции) напряжения на триггере	Стирание информации при освещении УФ-излучением
ЭСПЗУ	На поверхностном состоянии плавающего затвора транзистора ЭП	Туннельная инжекция	—	Стирание информации при инжекции заряда другого знака
СЗУПВ	В статическом триггере ЭП	Передача сигнала ряда на инвертор, вход	Считывание сигнала ряда (без формат. вход)	—
ДЗУПВ	На затворе транзистора ЭП	Передача сигнала ряда на инвертор, вход	Считывание сигнала ряда (с его изменением)	Необходима периодич. регенерация

В ЭП ПЗУ информация записывается на этапе изготовления П. у. (наличие или отсутствие ряда изготовок схемы, или перемычек). В ЭП на рис. 3, а перемычкой является цепь истока полевого транзистора. ЭП ПЗУ может также строиться на основе наличия или отсутствия диффузионных областей стока или истока (см. *Пробор с зарядовой связью*). Современные ПЗУ ёмкостью 1 Мбит состоят из ЭП площадью  $\approx 30 \text{ мкм}^2$  и с временем переключения  $\approx 80 \div 150 \text{ нс}$ .

ПЗУ представляют собой программируемые (уже после изготовления П. у.) ПЗУ, лишённые возможности стирания информации. В них используются ЭП с перемычкой (рис. 3, б), пережигаемой электрич. импульсом, или *p-n*-диод, *k-p*-ый замыкается накоротко при подаче импульса, вызывающего лавинный пробой. ПЗУ выполняются по биполярной (быстродействующие ПЗУ) и др. технологиям (см. *МДП-структура, Микропроцессор, Логические схемы*). Совр. биполярные ПЗУ ёмкостью 64 кбит состоят из ЭП площадью  $\approx 160 \text{ мкм}^2$  и с временем переключения  $\approx 50 \text{ нс}$  [3]. ЭП ПЗУ и ПЗУ относятся по сути к ЭП на изменениях (нарушениях) структуры носителя (создание или разрушение перемычек, замыкание диодов) со считыванием информации электрич. методами.

Работа ЭП СПЗУ и ЭСПЗУ основана на практически наст. удержании заряда. Заряд накапливается в проводящей области, находящейся внутри подзатворного оклада МДП-структуры, поэтому их работа определяется принципами работы МДП-приборов. Т. к. носители остаются в плавающем затворе и после отключения питания, СПЗУ и ЭСПЗУ являются энергонезависимыми П. у. [3, 4]. В ЭП СПЗУ (рис. 3, в) состоянии ЭП определяется наличием или отсутствием заряда на плавающем затворе полевого транзистора (МДП-транзистора) с двойным затвором. СПЗУ ёмкостью 1 Мбит состоят из ЭП площадью  $20 \div 30 \text{ мкм}^2$  и имеют время переключения  $80 \div 150 \text{ нс}$  [4]. ЭП ЭСПЗУ (рис. 3, г) содержит транзистор с плавающим затвором, отделённым от кремний-слоем оклада. Запись (стирание) информации осуществляется при пропускании туннельного тока между затвором и подложкой.

ЭП СЗУПВ строятся на базе *триггеров*. При этом могут использоваться как полевые транзисторы (рис. 3, в), так и транзисторы биполярные (рис. 3, е). По быстродействию биполярные СЗУПВ превосходят все остальные типы полупроводниковых П. у. Типичное время переключения биполярных СЗУПВ ёмкостью

16 кбит составляет менее 4 нс, а СЗУПВ ёмкостью 256 кбит — менее 30 нс, при размере ЭП 5 мкм и 2 мкм соответственно [3, 4].

Альтернативой статическому триггеру являются динамический ЭП, в *k-p* заряд хранится лишь в течение небольшого времени. Наиболее распространённый ЭП ДЗУПВ состоит из конденсатора и транзистора (рис. 3, ж). Транзистор используется лишь для досту-

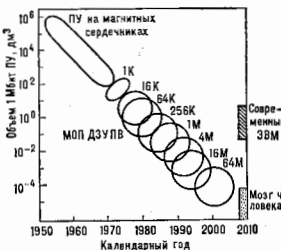


Рис. 4. Динамика увеличения плотности хранения информации для полупроводниковых устройств памяти.

па к заряду, хранящемуся в конденсаторе. Поскольку заряд постепенно уменьшается (из-за процессов генерации и рекомбинации), необходимо с периодом  $\sim 10^{-3}$  с регенерировать информацию в ЭП. Совр. ДЗУПВ имеют ёмкость в неск. Мбит. Динамика увеличения плотности размещения ЭП на носителе полупроводниковых П. у. представлена на рис. 4.

Сравнение предельных характеристик П. у. разл. типа приведено на рис. 5.



Рис. 5. Сравнение предельных характеристик устройств памяти различных типов.

Оптические элементы памяти [6]. В основе оптич. ЭП лежит явление *оптической нестабильности* или *мультистабильности* (см. также *Оптические компьютеры*). Реализация таких ЭП должна удовлетворять следующим требованиям: схема ЭП должна быть нелинейной и иметь *обратную связь*. Тогда при циклич. изменении,



Рис. 6. Интерферометр Фабри — Перо как оптический нестабильный элемент (а) и петля гистерезиса зависимости интенсивности прошедшего пучка от интенсивности падающего пучка (б): 1 — полупрозрачные зеркала.

напр., входной интенсивности светового пучка в входе оптич. нестабильного ЭП он может функционировать обратимо. Простейшим примером нестабильного оптич. ЭП является интерферометр Фабри — Перо, заполненный средой с насыщающимся поглощением (рис. 6, а). Поскольку пропускание интерферометра зависит от

длины резонатора, свойства заполняющего его вещества и длины световой волны, управляя параметрами вещества и интенсивностью падающего света, можно регулировать протекание интерферометра. Зависимость интенсивности прошедшего пучка от интенсивности падающего имеет вид сетки гистерезиса (рис. 6, б), где области 1 и 3 являются областями стабильности ЭП [6].

Мин. размер оптич. ЭП определяется минимально необходимым числом атомов ансамбля, для к-рого устойчиво наблюдается оптич. бистабильность. Это число составляет  $\approx 0,25$  двухуровневых атомов (полная энергия системы  $\approx 10^5$  фдЖ для фотонов с энергией 1,5 эВ). Такая ситуация имеет место в оптич. ЭП на базе GaAs при темп-ре 10 К, переключаемых энергией 15 фдЖ, распределённой на площади диаметра 0,25 мкм. Времена переключения ограничиваются временем установления поля в резонаторе, временем отклика среды и динамик. эффектами резонатора и могут достигать долей пс (рис. 5). Важными особенностями оптич. ЭП являются их высокая помехозащищённость от эл.-магн. шумов и высокая надёжность (кол-во переключений неограниченно).

**Перспективные элементы памяти.** Среди перспективных П. у. можно выделить голографически использующие для записи, хранения и восстановления изображений ЭП, основанные на принципах *голографии*. В этом случае мы имеем дело с аналоговыми ЭП, поскольку оптич. плотность носителя информации (напр., амплитудно-интенсивного слоя фотопластинки) изменяется непрерывно. Интенсивно развивающийся цифровой синтез *голограмм* позволяет сопоставить между собой голографич. ЭП и цифровые системы [7].

Среди перспективных полупроводниковых П. у. можно выделить устройства на одноквантовых диэлектрических ЭП (т.е. *Джозефсона эффект*) и на одноэлектронных ЭП (управление одиночными электронами в туннельных переходах сверхмалых размеров) [5]. Мин. размер одноквантовых диэлектрических ЭП ограничен силой величины порядка глубины проникновения  $\lambda \approx 0,1$  мкм, обеспечивающей плотность записи информации  $10^4 - 10^6$  бит/мм<sup>2</sup>. Времена переключения таких ЭП при темп-ре жидкого азота составляют  $\sim 10^{-11}$  с. В одноэлектронных ЭП их мин. размер ограничен толщиной туннельной прослойки ( $\approx 3 - 4$  нм). В перспективе такие ЭП позволят создать П. у. с плотностью записи информации  $10^8$  бит/мм<sup>2</sup> и временем переключения  $\sim 1$  нс [5].

Наряду с разработкой новых полупроводниковых ЭП интенсивно ведутся работы по созданию ЭП на молекулярном уровне (молекулярные ЭП) [8]. Для их реализации необходимы наличие в молекулярной системе не менее двух различных стабильных состояний системы, достаточно большое время их жизни и возможность избирательно переводить систему в каждое из этих состояний. Оценка плотности записи информации в молекулярном П. у. составляет  $\sim 10^6$  бит/мм<sup>2</sup>. При использовании частотно-селективной записи (т. е. спектральная память) её можно увеличить до значения  $\sim 10^8$  бит/мм<sup>2</sup> [8]. Путь уменьшения размера ЭП приводит след за разработкой молекулярных ЭП к атомным ЭП, в к-рых в качестве носителя информации может выступать одиночный атом. Действительно, двухуровневый атом представляет собой бистабильный логич. элемент, переключение к-рого осуществляется при переходе атома из одного энергетич. состояния в другое под действием внеш. поля.

**Иерархия П. у.** Наряду с делением П. у. по физ. принципам работы ЭП исторически сложилось деление П. у., используемых в ЭВМ, на внешние П. у., характеризующиеся большой ёмкостью информации (до 100 Гбит) и относительно большим временем доступа к информации ( $\geq 10^{-3}$  с); о перативные П. у., характеризующиеся ср. параметрами по быстродействию ( $\approx 100$  нс) и ёмкости (1-10 Мбайт); кэш-П. у. (от англ. cache — тайник) с ёмкостью от 100 байт до десятков кбайт п быстродействием  $\approx 10$  нс; регистры

ровые П. у. ёмкостью в деск. десятков байт и быстродействием  $\approx 0,5 - 1$  нс.

Назначение П. у. определяет тип ЭП, используемых в П. у. Напр., для кэш-П. у. применяются, как правило, биполярные схемы, для оперативного П. у. — ДЗУИВ или СЗУИВ.

**Архитектура П. у.** Под архитектурой П. у. понимается логич. организация совокупности аппаратных средств объединения ЭП. П. у. можно разделить по способам доступа к содержащейся в них информации и разрядности (числу одновременно считываемых бит информации). Существуют произвольный и последовательный метод доступа (чтения или записи) к информации в П. у. При произвольном методе доступа обращение происходит либо по заданному номеру ЭП, либо по ассоциативному признаку информации (заданному коду), определяемому номер ЭП. Простейшим примером ассоциативного доступа является поиск файла на магн. ленте по его имени (признаком является имя файла).

Кол-во одновременно записываемых (считываемых) бит определяет разрядность П. у. Увеличение разрядности П. у. приводит к снижению времени доступа к необходимой информации. Развитие архитектуры П. у. идёт по пути раснаращивания операций записи (считывания) информации (создание т. н. многопортовых П. у.), использования объёма носителя (ёмкостные П. у.) [4] и др.

Литм. 1) Вулъ В. А., Оптические дисковые запоминающие устройства, «Задачунари радиоэлектроника», 1986, № 9; 2) Перспективы развития вычислительной техники, под ред. Ю. М. Смирнова, кн. 9: Внешние запоминающие устройства на магнитном носителе, М., 1989; 3) Полупроводниковые запоминающие устройства, под ред. Ю. И. Смирнова, М., 1989; 4) Техника и технология интегральных схем будущего, «ТИЭР», 1986, т. 74, в. 12; 5) Лихарев К. К., Семенов В. К., Зорин А. В., Новые возможности для сверхпроводниковой электроники, в кн. Истоки науки и техники. Сер. Сверхпроводимость, т. 1, М., 1988; 6) Гиббс Х. М., Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света, пер. с англ., М., 1988; 7) Новые принципы оптической обработки информации, под ред. С. А. Ахмедова, М. В. Воронцова, М., 1989; 8) Рамбиди Н. Г., Замалии В. М., Молекулярная микроэлектроника: физические предпосылки и возможные пути развития, «Поверхность», 1986, № 8.

В. Н. Зайков, С. А. Филалитиев.

**ПАМЯТЬ ФОРМЫ** — свойство некоторых твёрдых тел восстанавливать исходную форму после пластич. деформации при нагреве или в процессе разгрузки. Восстановление формы, как правило, связано с *мартенситным превращением* или с обратным *двойникованием*. В зависимости от величины деформации и вида материала восстановление формы может быть полным или частичным. Полное восстановление формы может происходить в сплавах с термургитом мартенситом, таких, как Cu — Al — (Fe, Ni, Co, Mn), Ni — Al, Au — Cd, Ag — Cd, Ti — Ni, In — Ti, Cu — Zr — Al, Cu — Zn — Sn), и в ряде др. двойных, тройных и многокомпонентных систем. П. ф. в этих сплавах имеет место и в тех случаях, когда восстановлению формы противодействует внеш. нагрузка. Макс. величина обратной деформации зависит от кристаллич. структуры исходной и мартенситной фаз и ограничена величиной деформации решётки при фазовом переходе или сдвигом при двойниковании. Так, при мартенситном превращении в сплавах Ti — Ni она составляет  $\sim 9\%$ . Когда возможность деформации по мартенситному механизму для счёт обратному передовыванию истерзаны, дальнейшее формозамещение необратимо, т. к. оно происходит путём скольжения полных дислокаций.

Накопление обратной пластич. деформации в разл. температурных интервалах для одного и того же сплава может осуществляться по разным механизмам. Под воздействием внеш. напряжений в интервале темп-р ( $M_n - M_p$ ) прямого мартенситного превращения (где индекс «n» означает начало мартенситного превращения, а «p» — конец деформации осуществляется за счёт макроскопич. сдвига, связанного с образованием из исходной фазы преим. ориентированных кристаллов мартенсита. Из всех возможных вариантов взаим-

ной кристаллографии, ориентировки исходной и мартенситной фаз образуются лишь те, для к-рых работа внеш. сил имеет наиб. значение. Когда деформация подвергается образцу в мартенситном состоянии (в интервале темп-р ниже  $M_{H0}$ ), под действием приложенных напряжений происходит передислоцирование мартенситных кристаллов или их перерождения, что приводит к макроскопич. формоизменению. При нагреве в интервале темп-р обратного превращения восстанавливается структура и ориентировка кристаллов исходной фазы, что сопровождается восстановлением макроскопич. формы и размеров. Для данной системы интервал темп-р обратного мартенситного превращения, а следовательно, и интервал темп-р восстановления формы, зависит от состава сплава и может в широких пределах изменяться при изменении содержания осн. и легирующих элементов. На рис. 1 приведен график изменения линейных размеров образца из сплава  $Cu - Al - Ni$  под действием небольшой пост. нагрузки при охлаждении и нагреве. Мартенситное превращение в интервале темп-р  $M_H - M_N$  сопровождается постепенным удлинением образца до полного перехода исходной фазы в мартенситную. Обратное превращение, происходящее с небольшим температурным гистерезисом в интервале темп-р  $A_H - A_N$ , сопровождается полным восстановлением исходной формы образца.

Деформация при темп-ре, превышающей  $A_N$ , также может приводить к образованию кристаллов мартенсита. Последующее уменьшение и снятие напряжений вызывает (с нек-рым гистерезисом по напряжению) уменьшение и исчезновение этих кристаллов, восстанавливается стабильная при этих темп-рах в отсутствие напряжений высокотемпературная фаза, а следовательно, и исходная форма образца. П. ф., к-рая наблюдается при пост. темп-ре, получила назв. сверхупругости, аномальной упругости, сверхэластичности. На рис. 2 приведена типичная кривая  $\sigma - \epsilon$  при нагружении и разгрузке монокристалла сплава  $Cu - Al - Ni$  при темп-ре выше  $A_N$ . Нач. линейный участок кривой

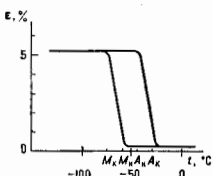


Рис. 1. Изменение длины образца из сплава  $Cu - Al - Ni$  при охлаждении и нагреве под действием постоянной нагрузки  $\sigma = 20$  МПа.

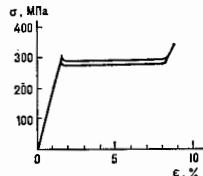


Рис. 2. Диаграмма растяжения монокристалла из сплава  $Cu - Al - Ni$  при комнатной температуре. Ориентировка осн. растяжения (100)β,  $M_H = 100^\circ C$ .

соответствует упругой деформации. Дальнейшее формоизменение обусловлено фазовым переходом. С повышением темп-ры деформации напряжение, при к-ром начинается мартенситное превращение, линейно возрастает в соответствии с ур-нием типа Клапейрона — Клаузуса:

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{\Delta H}{T\epsilon}$$

где  $\Delta H$  — теплота фазового превращения,  $\epsilon$  — деформация, связанная с полным превращением в мартенсит.

Под действием внеш. напряжений кроме мартенситной фазы, идентичной образующейся при охлаждении, как выше, так и ниже  $A_N$  могут возникать фазы, не стабильные в отсутствие внеш. сил. Так, в монокристаллах сплава  $Cu - Al - Ni$  наблюдались сверхупругости, обусловленная образованием ряда метастабильных фаз. За счёт образования и последующего исчезновения этих

фаз в процессе нагружения и разгрузки, при соответствующей ориентировке монокристалла, обратимая деформация при пост. темп-ре достигает 25%.

Нек-рые способы термич. и механич. обработки позволяют иницировать т. н. обратную П. ф. Так, деформация высокотемпературной фазы и многократный обратимый фазовый переход при охлаждении и нагреве под нагрузкой, а также нек-рые др. варианты комбинации деформации и термич. обработки приводят к последующему самопроизвольному (без внеш. нагрузки) изменению формы при охлаждении и её восстановлению при нагреве. Этот эффект обусловлен тем, что в исходной фазе образуются определённым образом закономеренно ориентированные дефекты, к-рые являются эффективными центрами зарождения мартенситных кристаллов с преимуществ. ориентировкой. Величина деформации в этом случае существенно меньше и не превышает веск. %.

В сплавах с большим температурным гистерезисом мартенситного превращения наблюдается лишь частичное восстановление формы. К таким сплавам можно отнести  $Nb - Ni$ ,  $Fe - Mn$ , нержавеющей сталь и др. В них уже небольшие противодействующие напряжения исключают восстановление формы. Это связано с тем, что во-первых, мартенситные фазы в этих сплавах обладают высокой симметрией, что допускает протекание обратного превращения по пути, отличному от прямого превращения. Во-вторых, образование мартенсита даже в отсутствие напряжения в этих сплавах сопровождается необратимым процессом возникновения и перемещения полных дислокаций.

Сплавы с П. ф. получают всё более широкое распространение в технике для изготовления термочувств. силовых элементов, трубчатых и др. разъемных и неразъемных соединений, исключаящих необходимость применения сварки и пайки, а также в медицине в качестве разл. фиксаторов при переломах и для др. целей.

Лит.: Коркилов И. И., Белоусов О. К., Качур Е. В., Никсид титана и другие сплавы с эффектом памяти, М., 1977; Эфенд памяти формы в сплавах, тез. докл. М., 1978; Тихонов А. С., Герасимов А. П., Прохорова И. И., Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении, М., 1981; Дихачев В. А., Кузьмин С. Л., Каменичев В. П., Эфенд памяти формы, т. 1, 1987. В. В. Мартынов, Л. Г. Хандрос.

ПАР — газообразное состояние, в к-рое переходит вещество в результате испарения, сублимации или кипения. Процесс перехода конденсиров. вещества в П. наз. *парообразованием*. Обычно П. находится в контакте с конденсир. фазой. Понятие газа и пара почти полностью эквивалентны; к газам относят вещества при темп-ре выше критической (т. н. *Критическая точка*), поэтому при повышении давления газ не переходит в конденсир. состояние. Процесс конденсации возможен лишь из парообразного состояния, т. е. при темп-ре ниже критической.

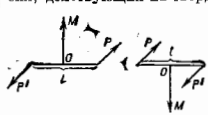
П. индивидуальных хим. веществ и их смесей, растворов, расплавов и т. п. состоит из смеси отд. молекул (атомов) и ассоциров. комплексов (*кластеров*), макс. число частей и к-рых растёт с ростом давления П. Состав П. определяется только экспериментально, т. е. методами масс-спектрометрии, он не всегда совпадает с составом конденсир. фазы, а для сложных веществ эти составы всегда различны. Равновесные состояния паровой и конденсир. фаз описываются *диаграммами состояния*, к-рые строят по эксперим. данным.

Между П. и конденсир. фазой осуществляется пост. обмен молекулами (атомами). При динамич. равновесии испаряющийся поток молекул каждого сорта равен обратному потоку данных молекул в конденсир. фазу. Условия, при к-рых достигается динамич. равновесие в системе П. — конденсир. фаза, — замкнутость объёма, постоянство темп-ры и *парциальных давлений* всех компонент, т. е. система должна быть термодинамически *эвкритной*. П., находящийся в равновесном состоянии, наз. в а с ц о н и м.

В пестационарных условиях [при наличии градиентов *дизимических потенциалов* и (или) в незамкнутом объёме] П. оказывается неравновесным и может быть как пересечением, так и недосечением. Парциальные давления всех его компонент при этом оказываются соответственно большими или меньшими равновесных. Температурная зависимость давления насыщенного П. дается *Клапейрона — Клаузиуса уравнением*. Давление П. над искривлёнными поверхностями описывается *Кельвина уравнением* и подчиняется *Лангса закону* (для П. над менисками в капиллярах).

Лит.: Кириллин В. А., Сичев В. В., Шейнман А. Е., Техническая термодинамика, 4 изд., М., 1983. Ю. Н. Любимов.

**ПАРА СИЛ** — система двух равных по модулю, параллельных и направленных в противоположные стороны сил, действующих на твёрдое тело. На рис. изображена П. с. (P, P'), где P' = -P. П. с. равнодействующей не имеет, т. е. её действие на тело не может быть механически эквивалентно действию к.-н. одной силы; соответственно П. с. нельзя уравновесить одной силой.



Расстояние *l* между линиями действия сил пары наз. плечом П. с. Действие, оказываемое П. с. на твёрдое тело, характеризуется её моментом, к-рый изображается вектором *M*, равным по модулю *P* и направленным перпендикулярно к плоскости действия П. с. в ту сторону, откуда поворот, к-рый стремится совершить П. с., виден происходящим против хода часовой стрелки (в правой системе координат). Осн. свойство П. с. состоит в том, что действие, оказываемое П. с. на данное твёрдое тело, не изменяется, если П. с. переносить куда угодно в плоскости пары или в плоскости, ей параллельной, а также если произвольно изменить модули сил пары и длину её плеча, сохраняя неизменным момент П. с. Т. о., момент П. с. — свободный вектор: его можно считать приложенным в любой точке тела. Две П. с. с одинаковыми моментами *M*, приложенные к одному и тому же твёрдому телу, механически эквивалентны одна другой. Любая система П. с., приложенных к данному твёрдому телу, механически эквивалентна одной П. с. с моментом, равным геом. сумме векторов-моментов этих П. с. Если геом. сумма векторов-моментов век-рой системы П. с. равна нулю, то эта система П. с. является уравновешенной.

С. М. Тара.  
**ПАРАБОЛИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ** — см. *Космические скорости*.

**ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПРИБЛИЖЕНИЕ** в статистической теории распространения волн — приближённый метод описания многократного рассеяния волн с учётом дифракции, эффектов в средах с крупномасштабными (по сравнению с длиной волны  $\lambda$ ) неоднородностями показателя преломления. В П. у. н. не учитывают рассеяния назад волн, а дифракция волн, рассеянных вперёд, описывают во френелевском приближении. С помощью П. у. п. в *марковском процессе приближения* удаётся получить замкнутые уравнения для статистич. моментов комплексной амплитуды поля волны, распространяющейся в статистически неоднородных средах (напр., турбулентных средах: атмосфере, океане, космос, плазме). Суть П. у. п. состоит в том, что совершается приближённый переход от эллиптич. уравнения (напр., волнового или уравн. Гельмгольца) к *Леонтовича параболическому уравнению*.

Напр., для скалярного уравн. Гельмгольца

$$\Delta u + k^2(1 + \tilde{\epsilon}(r))u = 0,$$

где  $k^2 = \omega^2 \bar{\epsilon} / c^2$  — квадрат среднего волнового числа, а  $\tilde{\epsilon} = [\epsilon(r) - \bar{\epsilon}] / \bar{\epsilon}$  — отнosit. величина флуктуаций параметра  $\epsilon(r)$ , описывающего преломляющие свойства

среды, после замены  $u(\rho, z) = v(\rho, z) \exp(ikz)$ ,  $\rho = (x, y)$ , получают параболич. уравн. для амплитуды  $v$ :

$$2ik\partial v / \partial z + \Delta_{\rho} v + k^2 \tilde{\epsilon}(\rho, z)v = 0, \quad \Delta_{\rho} = (\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2).$$

Условия применимости П. у. п. таковы:

$$\lambda \ll L, \quad \lambda L / l_{\rho} \ll (L / \lambda)^2, \quad \pi \lambda^2 \int_{\rho} \Phi(x) dx \ll 1,$$

где  $l_{\rho}$  — масштаб неоднородностей  $\epsilon(r)$ ,  $L$  — длина пути, проходящего волной в статистически неоднородной среде,  $\Phi(x)$  — спектральная плотность флуктуаций  $\epsilon$ . Последнее неравенство соответствует требованию малости суммарной энергии волн, испытывающих обратное рассеяние.

Для параболич. уравн. достаточно одного граничного условия, поэтому его решение обладает свойствами динамики, причинности, т. е. поле  $v(\rho, z)$  функционально зависит лишь от предшествующих по координате значений случайного параметра  $\tilde{\epsilon}$ . Это свойство (вместе со свойством линейности) оказывается необходимым при получении замкнутых уравн. для статистич. моментов поля  $v$ .

Лит.: Введение в статистическую радиофизику, ч. 2 — Рывтов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И., Случайные поля, М., 1978; Клячкин В. И., Стохастические уравнения и волны в случайно-неоднородных средах, М., 1980; Усима я р. А., Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах, пер. с англ., т. 2, М., 1981.

В. У. Заворотский.

**ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА ФУНКЦИИ**  $\rightarrow$  *Ф-ции, удовлетворяющие уравн.*

$$u'' + \left( -\frac{1}{4}z^2 + \nu + \frac{1}{2} \right) u = 0, \quad (1)$$

к-рое после замены  $u(z) = \exp(-z^2/4) v$ ,  $z = \xi \sqrt{2}$  переходит в уравнение Эрмита

$$v'' - 2\xi v' + 2\nu v = 0, \quad (2)$$

где  $\nu$  — комплексный параметр.

Пусть  $u = H_{\nu}(\xi)$  — решение уравн. (2), к-рое при  $\nu = n$  совпадает с полиномом Эрмита  $H_n(\xi)$ ,  $n = 0, 1, \dots$  (см. *Ортонормальные полиномы*). П. ц. ф.  $D_{\nu}(z)$  равна

$$D_{\nu}(z) = 2^{-\nu/2} \exp(-z^2/4) H_{\nu}(z/\sqrt{2}).$$

Т. к. уравн. (2) после замены  $s = \xi^2$  переходит в уравн.

$$s y'' + \left( \frac{1}{2} - s \right) y' + \frac{\nu}{2} y = 0,$$

решения к-рого можно выразить через *вырожденные гипергеометрические функции*  $F(a, c, z)$ , то получаем

$$D_{\nu}(\xi) = \frac{2^{\nu/2} \Gamma(\nu)}{\Gamma(1-\nu/2)\Gamma(\nu/2)} F\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \xi^2\right) - \frac{2^{\nu+1/2} \Gamma(\nu)}{\Gamma(-\nu/2)} F\left(\frac{1}{2}, \nu + \frac{3}{2}, \xi^2\right),$$

где  $\Gamma(t)$  — гамма-функция Эйлера. Отсюда легко получить разложения в степенные ряды и асимптотич. представления для ф-ции  $D_{\nu}(z)$ . Наряду с ф-цией  $D_{\nu}(z)$  уравн. (1) удовлетворяют также ф-ции  $D_{\nu}(-z)$ ,  $D_{\nu-1}(\pm iz)$ . Ф-ция  $D_{\nu}(z)$  вещественна при вещественных  $\nu$ , з. П. ц. ф. иногда наз. функциями Вебера.

Для функций Эрмита  $H_n(\xi)$  имеются интегральные представления

$$H_n(\xi) = \Gamma^{-1}(-\nu) \int_{-\infty}^{\infty} t^{-\nu-1} \exp(-t^2 - 2\xi t) dt, \quad \text{Re } \nu < 0, \quad (3)$$

ф-ла дифференцирования

$$\frac{d}{d\xi} H_{\nu}(\xi) = 2\nu H_{\nu-1}(\xi)$$

и рекуррентное соотношение

$$H_{\nu}(\xi) = 2\xi H_{\nu-1}(\xi) - 2(\nu-1) H_{\nu-2}(\xi).$$

Можно получить аналитич. продолжение ф-ции  $H_{\nu}(\xi)$ , определенной ф-лой (3), на область  $\text{Re } \nu \geq 0$ . Уравн. (1) возникает, напр., при разложении переменных

в волновом ур-нии, записанном в цилиндрич. координатах, при рассмотрении гармонич. осциллятора в квантовой механике п в др. задачах.

Лит.: Бейтмен Г., Эрдейи А., Высшие трансцендентные функции, пер. с англ., 2 изд., т. 2, М., 1974; Никифоров А. Ф., Уваров В. В., Специальные функции математической физики, 2 изд., М., 1984; Справочник по специальным функциям, пер. с англ., М., 1979. А. Ф. Никифоров.

**ПАРАДОКС ВОЗВРАТА** в статистической физике — кажущееся противоречие между существованием необратимых процессов в природе и теоремой А. Пуанкаре (H. Poincaré) о возвратах, согласно к-рой траектория консервативной динамич. системы в пространстве всех её обобщённых координат и импульсов (в фазовом пространстве  $N$  частиц) неограниченное число раз возвращается в окрестность своего нач. состояния. Предполагается, что нач. состояние выбирается случайным образом. П. в сформулирован Э. Цермело (E. Zermelo) в 1896 как возражение против *Больцмана  $H$ -теоремы*. Для доказательства теоремы Пуанкаре (1890) он воспользовался инвариантностью *фазового объёма* системы при движении её частиц согласно ур-ниям Гамильтона (*Лиувилля теорема*). Цермело заметил, что из теоремы Пуанкаре, если считать её неограниченно применимой к реальным системам статист. физики и исключить сингулярные нач. состояния, следовала бы невозможность необратимых процессов. Никакая однозначная, непрерывная и дифференцируемая ф-ция состояния, подобная *энтропии*, не могла бы монотонно возрастать, т. к. каждому её возрастанию соответствовало бы её убывание при возвращении системы в нач. состояние. Разрешение П. в связи с теорией *флуктуиций* (см. *Парадокс обратимости*). В действительности теорема о возвратах Пуанкаре не имеет большого значения для статист. физики, т. к. время возврата системы в микроскопич. нач. состояние чрезвычайно велико и подобный возврат имеет нулевую вероятность, а рассмотренные процессы возврата в макроскопическое состояние, как показал М. Смолуховский (M. Smoluchowski), не приводят к парадоксам.

Лит.: см. при ст. *Парадокс обратимости*. Д. Н. Зубарев. **ПАРАДОКС ВРЕМЕНИ** (парадокс близнецов, парадокс часов) — кажущееся противоречие, возникающее в частной (специальной) *относительности теории* при нахождении промежутков времени, показываемых двумя часами  $A$  и  $B$ , идущими часами  $A$  всё время покоясь в инерциальной системе отсчёта, а часы  $B$  улетели от  $A$ , совершили путешествие и вновь вернулись к  $A$ . Противоречие возникает при след. рассуждении. Согласно частной теории относительности, если по показаниям часам  $A$  прошёл промежуток времени  $t_1$ , то по движущимся с пост. скоростью  $v$  часам  $B$  пройдет промежуток времени

$$\bar{t} = t_1 \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (1)$$

Если скорость движения часов  $B$  меняется с течением времени, то

$$\bar{t} = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - v^2(t)/c^2} dt, \quad (2)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  — моменты начала и конца измерения времени по часам  $A$ . После возвращения  $B$  к  $A$  промежуток времени  $t_1$  измеренный часами  $B$ , всегда меньше промежутка  $t_2$  измеренного часами  $A$ , т. е. часы  $B$  отстают от  $A$ . Т. к. движение относительно, то, казалось бы, можно обратить рассуждение: считать часы  $B$  неподвижными, а часы  $A$  путешествовавшими и поэтому идущими медленнее, чем  $B$ . Тогда после возвращения должны отстать часы  $A$ . Полученное противоречие и наз. П. в. или парадоксом часов.

Вместо часов часто рассматривают двух близнецов, из к-рых один остается на Земле, а другой совершил путешествие и космосе, а затем возвратился на Землю. Разницу в протекшем времени непосредственно

определить по тому, кто из близнецов окажется старше. Поэтому упомянутое противоречие называют также *парадоксом близнецов*.

В действительности противоречие (парадокс) возникло из-за некорректности рассуждения. Правильное рассуждение состоит в следующем. Часы  $A$  всё время находились в инерциальной системе отсчёта, они не подвергались ускорениям. В этой системе отсчёта ф-ла (2) всё время справедлива, и вывод о том, что по возвращении останут часы  $B$ , правлен (путешествовавший близнец окажется моложе своего брата, оставшегося на Земле). Система отсчёта, связанная с часами  $B$ , не может быть всё время инерциальной, поскольку эти часы подвергались ускорению. В неинерциальных системах отсчёта ф-ла (2) неверна, и при рассмотрении хода движущихся часов надо учитывать ускорения, имеющиеся в системе отсчёта. Поэтому и вывод о том, что с точки зрения  $B$  часы  $A$  должны по возвращении отстать от  $B$ , неверен. В общем случае неинерциальных систем отсчёта ф-ла (2) должна быть заменена след. выражением:

$$\bar{t} = \frac{1}{c} \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{g_{00} + 2g_{0i}x^i + g_{ik}x^i x^k} dt. \quad (3)$$

Здесь  $g_{00}$ ,  $g_{0i}$ ,  $g_{ik}$  — компоненты *метрического тензора*, характеризующего систему отсчёта (по дважды встречающимся индексам подразумевают суммирование, латинские буквы принимают значения 1, 2, 3),  $x^0$  — временная,  $x^i$  — пространственные координаты,  $\dot{x}^i$  — компоненты скорости движущихся часов. Ф-ла (3) справедлива также при наличии полей тяготения, тогда вместо частной теории относительности следует пользоваться общей теорией относительности (см. *Тяготение*).

Выводы о замедлении времени на движущихся телах и о влиянии на течение времени полей тяготения непосредственно проверены экспериментально и подтверждают теорию.

Лит.: см. при ст. *Относительности теория*, *Тяготение*. И. Д. Новиков.

**ПАРАДОКС ОБРАТИМОСТИ** в статистической физике — кажущееся противоречие между обратимым характером движения молекул газа и очевидной необратимостью процессов переноса (теплопроводности, вязкости, диффузии). П. о. был сформулирован И. Лосмидтом (J. Loschmidt) в 1876 как возражение против *Больцмана  $H$ -теоремы* для кинетич. ур-ния газа, из к-рого следует, что  $H$ -функция Больцмана не может возрастать [1—2].

Парадоксы *кинетической теории газов* возникли в связи с попытками обоснования *второго начала термодинамики* исходя из ур-ний механики. Обратимость ур-ний механики по отношению к *обращению времени* (замене  $t \rightarrow -t$ ) связана с тем, что в отсутствие магн. поля) они содержат лишь вторые производные по времени, и поэтому нельзя отличить ур-ния механики, написанные для возрастающего времени, от ур-ний для убывающего времени. Если  $H$ -функцию Больцмана можно было бы получить лишь на основе механики, это привело бы к противоречию со вторым началом термодинамики о возрастании энтропии, т. к. для газов энтропия равна  $H$ -функции Больцмана (умноженной на  $k$ ) с обратным знаком.

При формулировке П. о. предполагается, что кинетич. ур-ние можно вывести из ур-ний механики без привлечения к-л. вероятностных гипотез. В действительности в выводе Больцмана явно содержится предположение вероятностного характера о том, что число столкновений пропорц. произведению *функций распределения* сталкивающихся частиц, т. е. состояния между каждым столкновением не коррелирует (гипотеза «молекулярного хаоса»). Более строгий вывод кинетич. ур-ния, данный Н. Б. Боголюбовым в 1946 [3], явно использует граничное условие «ослабления корреляций», имеющее вероятностный смысл.

Кроме того, для разъяснения П. о. существует, что при учёте флуктуаций (даже для газа) нет простой связи между энтропией  $S$  и одночастичной ф-цией распределения  $f_1$ , к-рая следует из ур-ния Больцмана ( $S = -k \langle \ln f_1 \rangle$ ). На самом деле это лишь первый член разложения  $S$  по степеням плотности. Энтропия может зависеть от флуктуаций, к-рые описываются корреляционными функциями. Корреляц. часть энтропии установлена Г. Гривом в 1953 [4].

П. о. существенно просветляется теорией флуктуаций, т. к. она показывает, что равновесное состояние соответствует максимуму вероятности, а отклонения от него, связанные с заметными флуктуациями, маловероятны. Относит. флуктуация наблюдаемых физ. величин (пропорциональных числу частиц  $N$ ) имеет порядок  $1/\sqrt{N}$  (вдали от точек фазового перехода).

Связь явлений необратимости с флуктуациями рассмотрел М. Смолуховский в 1906—16 [5] на примерах броуновского движения частиц под действием сил и диффузии в коллоидных растворах. Он исследовал непрерывный переход от необратимого поведения (движение около положения равновесия, замедленного внутри тремлем) к неупорядоченному броуновскому движению. Для коллоидных растворов он исследовал непрерывный переход от обычной необратимой диффузии концентрации примеси к неупорядоченным, случайным флуктуациям концентрации. Кроме того, он дал оценку в р е м е н и в о з в р а т а (см. Парадокс возврата) для макроскопич. состояний, к-рое вполне наблюдаемо (для микроскопич. состояний время возврата чрезвычайно велико и находится далеко за пределами возможных наблюдений). Оценки Смолуховского получили эксперим. подтверждение.

Для конденсиров. сред кинетич. ур-ние, вообще говоря, несправедливо, и система описывается ф-цией распределения  $f_N$  всех её частей по координатам и импульсам, удовлетворяющей Лиувиллю уравнению, выражающему закон сохранения вероятности в фазовом пространстве. Однако П. о. имеет место и в этом случае. Он связан с кажущимся противоречием между существованием необратимых процессов и обратимым характером ур-ния Лиувилля: симметрией относительно замены времени  $t \rightarrow -t$  и импульсов частиц  $p_i \rightarrow -p_i$  при неизменных координатах.

Возможность возрастания энтропии может быть обоснована методами статистич. механики, к-рая приводит к выражению для положительного локального производства энтропии, связанного с внутр. неравновесностью системы, что соответствует термодинамике неравновесных процессов. При этом для кинетических коэффициентов получаются выражения, пропорц. пространственно-временным корреляц. ф-циям потоков энергии, импульса и вещества (Грина — Кубо формулы). Энтропия системы в неравновесном случае определяется через локально-равновесное распределение  $f_{\text{лок}}$  ф-цией  $S = -k \langle \ln f_{\text{лок}} \rangle$ . Она соответствует максимуму информации энтропии при условии, что средние локально-равновесные значения плотности энергии, импульса и числа частиц равны их средним значениям, причём эти средние вычислены с помощью ф-ция распределения, удовлетворяющей ур-нию Лиувилля (хотя  $f_{\text{лок}}$  ему не удовлетворяет). Возрастание энтропии связано с отбором запаздывающих решений ур-ния Лиувилля. Опержающие решения должны быть отброшены, т. к. приводяло бы к убыванию энтропии [6]. Отбор запаздывающего решения ур-ния Лиувилля осуществляется введённым в него бесконечно малым членом, нарушающим его симметрию относительно обращения времени.

Лит.: 1) Больцман Л., Избранные труды, пер. с нем., Физматг., М., 1984; 2) Ка и М., Несколько вероятностных задач физики и математики, пер. с польск., М., 1987; 3) Б е г о л о в с к о в Н. И., Проблемы динамической теории в статистической физике, М.—Л., 1946; 4) Г р е е н Н., The molecular theory of fluids, Amst., 1952; 5) Я н ш т е й н А. А., См о л у х о в с к и й М., Броуновское движение, Сб. ст., Л., 1936; 6) З у-

барев Д. Н., Современные методы статистической теории неравновесных процессов, в кн.: Итоги науки и техники. Сор. Современные проблемы математики, т. 15, М., 1980. Д. Н. Зубарев.

**ПАРАКСИАЛЬНЫЙ ПУЧОК ЛУЧЕЙ** света (от греч. παρά — возле и lat. axis — ось) — пучок лучей, распространяющихся вдоль оси центрированной оптич. системы и образующих очень малые углы с осью и нормальными к преломляющим и отражающим поверхностям системы. Осн. соотношения, описывающие образование изображений оптически в осесимметричных системах, строго справедливы только для П. п. л. Только в изображениях, создаваемых такими лучами, отсутствуют аберрации оптических систем (кроме хроматич. аберрации в линзовых системах). На практике, однако, под П. п. л. обычно понимают пучок лучей, проходящих под конечными (неск. градусов) углами, для к-рых отступления от строгих соотношений настолько малы, что ими можно пренебречь. Область вокруг оптич. ось системы, в к-рой лучи можно считать параксиальными, тоже наз. параксиальной.

**ПАРАЛЛАКС** (от греч. parallaxis — отклонение) в а с т р о н о м и — изменение направления наблюдателя — астр. объект при смещении точки наблюдения, равное углу, под к-рым из центра объекта видно расстояние между двумя положениями точки наблюдения. Обычно используются П., связанные с перемещением наблюдателя из-за вращения Земли вокруг своей оси (суточный П.), движения Земли вокруг Солнца (годовой П.), движения Солнечной системы в Галактике (вековой П.). П. (точнее, его синус) связан с расстоянием до объекта обратно пропорц. зависимостью.

Суточный П. скаывается на положениях Луны, Солнца, др. планет и тем Солнечной системы. Т. к. расстояния до этих тел не очень велики по сравнению с размерами Земли, направления на эти объекты из разл. точек Земли получаются различными. Для однородности наблюдений условилось приводить их к центру Земли (т. н. геоцентрич. направления). Угол, под к-рым из центра астр. объекта виден экваториальный радиус Земли, наз. г о р и з о н т а л ь н ы м э к в а т о р и а л ь н ы м П. Этот угол ( $\delta$ ) связан с расстоянием между центрами Земли и объекта ( $D$ ) соотношением:  $\sin \delta = R/D$ , где  $R$  — экваториальный радиус Земли. Наб. экваториальный горизонтальный П. имеет Луну (его значение меняется от 53,9' до 61,5'). Ср. значение П. Солнца принято равным 8,794'', что соответствует расстоянию 149 597 870 км. Это расстояние наз. астр. единицей (а. е.) и используется в пределах Солнечной системы как эталон длины.

Годичный П. применяется для оценки расстояний до звёзд. Осн. единицей измерения служит парсек — такое расстояние, при к-ром а. е. видна под углом в 1". П а р с е к прибл. равен 30,857·10<sup>10</sup> км. Для объектов разл. удалённости разработан ряд методов измерения годичных П. Наб. простой — метод т р и г о н о м е т р и ч. П., применяемый для измерения расстояний до ближайших звёзд. Вследствие движения Земли вокруг Солнца изменяются положения близких звёзд по отношению к более удалённым. Это изменение измеряют, сравнивая две снимка одного и того же участка неба, сделанных с интервалом в полгода (тригонометрич. П.). Тригонометрич. П. измерены для звёзд, расположенных в окрестностях Солнца в сфере с радиусом 70—100 кп. Одни тригонометрич. П. не дают возможности изучать строение как ближайшей части Вселенной, так и Галактики, но они являются основой для др. методов измерения расстояний.

Вековой П. даёт статистич. оценку ср. расстояний групп звёзд (в предположении хаотич. распределения собств. скоростей звёзд). Из-за движения Солнца к апенсу со скоростью 4,2 а. е. в год у звёзд, находящихся на ~90° от апекса, появляются составляющая собств. движения (угл. смещения за год) в сторону

антипекса (вековой П.). Вековые П. применяются для изучения структуры и динамики Галактики.

Для многих космич. объектов при определении расстояний используют не принцип перемещения наблюдателя в пространстве, а др. физ. закономерности. Большое распространение получили т. в. фотометрич. способы определения П. (фото метри ч. П.). Если  $M$  — абс. звездная величина объекта,  $m$  — его видимая звездная величина, то П.

$$p = 10^{0,2(M-m)-1}$$

Разность  $m - M$  наз. модулем расстояния и может быть определена для большого класса объектов различными косм. методами. Наиб. развитие получили такие разновидности фотометрич. П., как спектральные П. и цефеиды П.

Спектральные П. основаны на том, что для некоторых звезд определенных спектральных классов отношения интенсивностей ряда пар линий [напр.,  $K/H$ ,  $K/H\delta$  ( $K$  — линия CaII 3934 Å), HeI 4200 Å/CaI 4227 Å и др.] находятся в четкой статистич. зависимости от светимости звезды. Измерив отношение интенсивностей таких пар линий, можно определить модуль расстояния и П. звезды по калибровочной кривой, полученной для звезд с известными тригонометрич. П. Таким методом измерены расстояния до >60 000 звезд.

Цефеиды П. определяются для нек-рых типов переменных звезд, у к-рых обнаружена статистич. зависимость период — светимость. Зная тип переменности и период изменения блеска, можно найти модуль расстояния и тем самым П. для расстояния до области неба, где находится эта переменная звезда. Таким методом удалось расширить возможности определения расстояний до 3 Мпк.

Существует ряд способов определения П. для нек-рых сравнительно редких объектов Вселенной. По оценкам светимости новых звезд в максимум блеска удается определить расстояния до 10 Мпк, интегральн. абс. звездные величины шаровых скоплений позволяют измерять расстояния до 25 Мпк, абс. звездные величины сверхновых в максимум блеска — до 100 Мпк (подробнее см. *Расстояний шкала*). Для ещё больших расстояний используются статистически установленная связь красного смещения линий в спектрах удаленных галактик с их расстояниями:

$$r = c\Delta\lambda/\lambda H,$$

где  $\Delta\lambda$  — смещение линии с длиной волны  $\lambda$  в красную часть спектра, а  $H$  — Хаббла постоянная, принятая равной (50—100) км·с<sup>-1</sup>·Мпк<sup>-1</sup>.

Лит. см. при от. *Расстояний шкала*. Ю. И. Прохан. ПАРАЛЛЕЛОГРАММ СИД (греч. parallélogrammon, от parallēlos — параллельный и gramma — линия) — геом. построение, выражающее закон сложения сил: вектор, изображающий силу, равную геом. сумме двух сил, является диагональю параллелограмма, построенного на этих силах как на его сторонах. Для двух сил, приложенных к телу в одной точке, сила найденная построением П. с., является одновременно равнодействующей данных сил (закон П. с.).

ПАРАМАГНЕТИЗМ — свойство веществ (парамагнетиков) намагничиваться в направлении внеш. магн. поля. Приставка «пара» (греч. «возле», «рядом») указывает на слабость эффекта по сравнению с ферромагнетизмом. Кроме того, в отличие от ферро-, ферри- и антиферромагнетизма, П. не связан с магнитной атомной структурой, и в отсутствие внеш. магн. поля намагниченность парамагнетика равна нулю.

П. обусловлен в основном ориентацией под действием внеш. магн. поля  $H$  собств. магн. моментов  $\mu$  частиц парамагн. вещества (атомов, ионов, молекул). Природа этих моментов может быть связана с орбитальным движением электронов, их спином, а также (в меньшей степени) со спином атомных ядер. При  $\mu H \ll kT$ , где  $T$  — абс. темп-ра, намагниченность парамагнетика

$M$  пропорциональна внеш. полю:  $M = \chi H$ , где  $\chi$  — магнитная восприимчивость. В отличие от диамагнетизма, для к-рого  $\chi < 0$ , при П. восприимчивость положительна; её типичная величина при комнатной темп-ре ( $T \approx 293$  К) составляет  $10^{-7}$ — $10^{-4}$ .

П. свободных атомов и ионов определяется в основном полным моментом импульса электронной оболочки, характеризующимся квантовым числом  $J$ . В магн. поле  $H$  осн. уровень энергии атома расщепляется на  $2J + 1$  магн. подуровней, разделённых одинаковыми интервалами  $\mu_B g_J H$ , где  $\mu_B$  — магнетон Бора и  $g_J$  — Ланде множитель (см. *Земана эффект*). Каждому подуровню соответствует квантованное значение проекции  $\mu_H$  магн. момента атома на направление  $H$ :  $\mu_H = g_J \mu_B m_J$ , где  $m_J = J, J - 1, \dots, -J$ . При термодинамич. равновесии, согласно Больцмана распределению, преим. заселяются ниж. подуровни с макс. значениями  $\mu_H$ . В направлении  $H$  образуется результирующий магн. момент, равный

$$M = N g_J \mu_B J B_J(a), \quad (1)$$

где  $N$  — число магн. атомов,  $a = g_J \mu_B J H / kT$ ,  $\Phi$ -ция

$$B_J(a) = \frac{2J+1}{2} \text{cth} \frac{2J+1}{2} a - \frac{1}{2J} \frac{a}{\text{th} \frac{a}{2J}} \quad (2)$$

является  $\Phi$ -цией Бриллюана (см. *Ланжевена функция*). При  $a \ll 1$  (слабые поля, высокие темп-ры)  $\Phi$ -ла (1) принимает вид

$$M = N \mu_0^3 \chi_0^2 kT, \quad (3)$$

где  $\mu_0 = g_J \mu_B \sqrt{J(J+1)}$  — эффективный магн. момент атома. Отсюда вытекает Кюри закон для парамагн. восприимчивости:

$$\chi = C/T, \quad (4)$$

где  $C = N \mu_0^3 / 3k$  — постоянная Кюри.

При  $a \gg 1$  (сильные поля, низкие темп-ры) из (1), (2) следует:  $M = N g_J \mu_B$ , т. е. достигается магн. насыщение (все микроскопич. моменты ориентированы в направлении  $H$ ). В классич. пределе ( $J \rightarrow \infty$ )  $\Phi$ -ция  $B_J(a)$  переходит в  $\Phi$ -цию Ланжевена  $L(a') = \text{ctha}' - 1/a'$ , где  $a' = \mu_0 H / kT$ , а  $\mu_0$  — классич. магн. момент частицы. Именно в этих терминах П. Ланжевеном (P. Langevin, 1906) была построена первая теория П. Типичная зависимость  $M$  от  $H/T$  для парамагн. соли, в к-рой П. обусловлен ионами  $Gd^{3+}$  ( $J = 7/2$ ,  $g_J = 2$ ), показана на рис. 1.

$\Phi$ -лы (1) — (4) справедливы для осн. состояния атома с заданным  $J$ . Влияние вышележащих уровней приводит к двум поправкам. Во-первых, если возбуждённые уровни достаточно заселены, т. е. соответствующие энергетич. интервалы  $\Delta \epsilon \lesssim kT$ , то состояния с другими  $J$  дают внесредств. вклад в  $\chi$ . Во-вторых, примесь вышележащего квантового состояния приводит к появлению наведённого поля магн. момента атома  $\mu' = aH$ , вносящего в восприимчивость по зависящую от темп-ры добавку  $N a$ . Она растёт с уменьшением  $\Delta \epsilon$  и в нек-рых случаях (напр., для  $Sm^{3+}$  и особенно для  $Eu^{3+}$  в к-рого ниж. уровень не магнитный  $J = 0$ ) даёт осн. вклад в П. (см. *Ванфлюксовский парамагнетизм*).

П. твёрдых диэлектриков. В твёрдых непроводящих парамагнетиках обычно носителями магн. моментов являются частицы с недостроенными электронными оболочками, прежде всего ионы переходных металлов групп

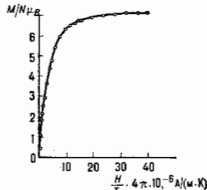


Рис. 1. Зависимость намагниченности  $M$  от  $H/T$  для сульфата гадолиния.



Fe, Pd и Pt, лантаниды и актииды. Действующее на них электрич. внутрикристаллическое поле частично или полностью снимает вырождение осн. энергетич. уровней магн. иона (см. *Шарка эффект*), что делает простые ф-лы (1) — (4) недостаточными. При этом, согласно *Крамера теореме*, для атомов (ионов) с полуделым спином (вечным числом электронов) всегда остаётся по крайней мере двукратное вырождение, снимаемое только в магн. поле.

У ионов лантанидов и актиидов нестроенные 4f- и 5f-оболочки в значит. мере экранированы внеш. электронами, влияние на них внутрикристаллич. поля минимально,  $J$  остаётся хорошим квантовым числом, а распределение уровней  $\sim 10^4$  см<sup>-1</sup>. При высоких темп-рах ( $kT \gg \Delta\mathcal{E}$ ) это распределение не оказывает существенного влияния на  $\Pi$ , и ф-лы (1) — (4) хорошо согласуются с опытом. Это видно из табл. 1, где приведены теоретически рассчитанные и определённые экспериментально (из закона Кюри) значения  $\mu_B$  для ряда редкоземельных ионов в жидких растворах парамагн. солей.

При более низких темп-рах происходит перераспределение асепальностей штарковских уровней, приводящее к нарушению закона Кюри.

Табл. 1. — Множители Ланде и эффективные магнитные моменты ионов лантанидов

Ион	Ce <sup>3+</sup>	Pr <sup>3+</sup>	Nd <sup>3+</sup>	Sm <sup>3+</sup>	Eu <sup>3+</sup>	Gd <sup>3+</sup>
$J$	5/2	4/5	9/2	5/2	0	7/2
$g_J$	6/7	4/5	8/11	2/7	0	2
$g_N(J+1)$	2,54	3,58	3,62	0,85	0	7,94
$\mu_B/\mu_B$ (эксперим.)	2,39	3,6	3,62	1,54	3,6	7,9

Ион	Tb <sup>3+</sup>	Dy <sup>3+</sup>	Ho <sup>3+</sup>	Er <sup>3+</sup>	Tm <sup>3+</sup>	Yb <sup>3+</sup>
$J$	6	15/2	8	15/2	6	7/2
$g_J$	3/2	4/3	5/4	6/5	7/6	8/7
$g_N(J+1)$	9,2	10,6	10,6	9,58	7,56	4,54
$\mu_B/\mu_B$ (эксперим.)	9,6	10,5	10,5	9,5	7,2	4,4

Для ионов группы Fe, магн. свойства к-рых связаны с нестроеной 3d-оболочкой, влияние внутрикристаллич. поля более существенно: оно разрывает спин-орбитальную связь, и магн. ион характеризуется орбитальным ( $L$ ) и спиновым ( $S$ ) квантовыми числами. Расщепление орбитального мультиплета внутрикристаллич. полем достигает обычно  $10^4$  см<sup>-1</sup>, причём ср. значение проекции орбитального момента в осн. состоянии часто равно нулю — происходит *замораживание орбитального момента* внутрикристаллич. полем. В последнем случае в ф-лах (1) — (4) достаточно заменить  $J$  на  $S$ , а  $g_J$  на  $g_S = 2$ . Сравнение вычисленных таким образом значений с экспериментом дано в табл. 2.

Табл. 2. — Спины и эффективные магнитные моменты ионов группы железа

Ион	Ti <sup>3+</sup>	V <sup>3+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Mn <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
$S$	1/2	1	3/2	2	5/2	2	3/2	1	1	1/2
$2\sqrt{S(S+1)}$	1,73	2,83	3,87	4,90	5,92	4,90	3,87	2,83	1,73	1,19
$\mu_B/\mu_B$ (эксперим.)	1,8	2,8	3,8	4,9	5,9	3,4	4,8	3,2	1,9	

Наблюдаемое для нек-рых ионов расхождение отности к более сложному случаю, когда осн. состояние вырождено и вкладом орбитального магнетизма пренебречь нельзя. Ещё сильнее влияние поля лантаноидов (см. *Внутрикристаллическое поле*) в веществах, содержащих ионы группы Pd и Pt, а также в парамагн.

комплексах, где  $\Pi$  определяется заполнением молекулярных орбит.

При низких темп-рах, когда заселён только ниж. орбитальный (штарковский) уровень, магн. свойства ионов переходных элементов в парамагнетиках описываются *спиновым гамильтонианом* — эфф. оператором энергии, содержащим явно лишь спиновые переменные. Влияние частично «замороженного» орбитального момента учитывается набором параметров. Оно проявляется в небольшом ( $\sim 1$  см<sup>-1</sup>) расщеплении спинового мультиплета, ведущем к отклонению от закона Кюри, и в анизотропии  $g$ -тензора, заменяющей мультиплета. Наиб. анизотропия наблюдается для нек-рых лантанидов: так, гл. значения  $g$ -тензора для иона Tb<sup>3+</sup> могут составлять  $g_3 = 18$ ,  $g_1 < 0,01$ . В таких случаях вектор намагниченности парамагнетика может значительно отклоняться от направления  $H$ .

П. металлов и полупроводников. Дополнит. вклад в П. металлов обусловлен электронами проводимости, обладающие спином  $s = 1/2$  и магн. моментом  $\mu_B$ . Квантование проекции  $\mu_B$  приводит, с учётом *Ферми-Дирака распределения*  $f(\mathcal{E})$ , к появлению намагниченности

$$M = \frac{1}{2} \mu_B \int_{\mathcal{E}_F - \mu_B H}^{\mathcal{E}_F + \mu_B H} f(\mathcal{E}) d\mathcal{E} \approx \mu_B^2 H f(\mathcal{E}_F),$$

где  $\mathcal{E}_F$  — *Ферми-уровень*. Соответствующая восприимчивость  $\chi_{\Pi} = \mu_B^2 f(\mathcal{E}_F)$  практически не зависит от темп-ры (см. *Паули парамагнетизм*). Для свободного электронного газа  $f(\mathcal{E}_F) = 12\pi m^{-2} \pi(3/4)^{3/2} N^{1/2} = 3N/2\mathcal{E}_F$ , где  $m$  — масса электрона и  $N$  — концентрация свободных электронов. В реальных металлах из-за взаимодействия электронов проводимости с решёткой и между собой ф-лы усложняются. В частности, вместо  $\mu_B$  вводится эфф. масса  $m^*$ , а  $\mu_B$  заменяется на эффективный магн. момент. Экспериментальные значения  $\chi_{\Pi}$  для щелочных металлов, не содержащих ионов с нестроеными оболочками, сопоставлены с теорией в табл. 3.

На практике парамагнетизм Паули проявляется на фоне *Ландау диамагнетизма*, также обусловленного электронами проводимости. В сильных магн. полях и при низких темп-рах эти два эффекта нельзя рассматривать независимо, и квантование в магн. поле ведёт к характерной осциллирующей зависимости  $M$  от  $H$  (см. *Де Хааса — ван Альфена эффект*).

П. электронов проводимости и дырок в полупроводниках определяется их концентрацией и эфф. магн. моментом, зависящим от зонной структуры полупроводника. В простейшем случае  $\chi = A T^{-1} \exp(-\Delta\mathcal{E}/2kT)$ , где  $\Delta\mathcal{E}$  — ширина запрещённой зоны и  $A$  — параметр вещества. Обычно эта зависимость усложняется за счёт влияния примесей и др.

**Ядерный П.** Магнитные моменты атомных ядер  $\mu_N$  в  $10^3$ — $10^4$  раз меньше  $\mu_B$ , поэтому ядерная парамагнитная восприимчивость  $\chi_N = N \mu_N^2 / 3kT$  составляет всего  $10^{-6}$ — $10^{-8}$  электронной. Наблюдать ядерный П. в чистом виде удаётся лишь при очень низких температурах в веществах, где нет неспаренных электронов и величина  $\mu_N$  максимальна (например, в твёрдом водороде в жидком <sup>3</sup>He). В последнем случае квантовые свойства ферми-жидкости обуславливают независимость  $\chi_N$  от температуры (ядерный аналог парамагнетизма Паули).

В парамагнетиках Ваи Флека (LiTmF<sub>4</sub>, PrCu<sub>2</sub> и др.) ядерный П. усиливается в  $10^2$ — $10^3$  раз за счёт *сверхтонкого взаимодействия* ядра парамагн. иона с его

Табл. 3. — Парамагнитная восприимчивость Паули для щелочных металлов

Металлы	Li	Na
$\chi_{\Pi} \cdot 10^4$	теория 24,4	20,0
	эксперимент 27,2	22,7

электронной оболочкой, обладающей наведённым магн. моментом. Искусств. усиление ядерного П. достигается методами дипляч. поляризации ядер (см. Ориентированные дриа, Овергаузера эффект).

**Коллективные эффекты.** Взаимодействия между параметр. микрочастицами наиб. существенны в твёрдых телах. Они приводят к замене *Законя закона на Кюри* — *Вейса закон*  $\chi = C/(T - \theta)$ , где параметр  $\theta$  по порядку величины соответствует энергии взаимодействия. Знак  $\theta$  положительн, если при охлаждении парамагнетика до *Кюри точки* возникает ферромагнетизм (Fe, Co, Ni и др.), и отрицателен, если при охлаждении до *Нееля точки* вещество становится антиферромагнитным (напр., Dy, MnO, FeSO<sub>4</sub>). В концентриров. парамагнетиках, где магн. частицы образуют осв. решётку вещества, гл. роль играют *обменные взаимодействия*, стремящиеся ориентировать соседние магн. моменты параллельно либо антипараллельно друг другу. В разбавленных парамагнетиках — твёрдых растворах магн. ионов в диамагн. матрицах — преобладают магн. *диполь-дипольные взаимодействия*, знак к-рых зависит от относ. расположения магн. частиц. В этом случае, а также при конкуренции ферро- и антиферромагн. обмена, охлаждение парамагнетика может породить состояние *стислого стекла*.

Близко расположенные примесные магн. центры, связанные сильным обменным взаимодействием, иногда образуют *суперпарамагн. кластеры*, обладающие увеличенным магн. моментом (обменно-усиленный П.). Макроскопич. аналог таких систем — существование мелких ферромагн. частиц в жидких или твёрдых растворителях (см. *Суперпарамагнетизм, Магнитные жидкости*). К резкому усилению П. ведут и обменные взаимодействия электронов проводимости в нек-рых металлах (напр., в Pd и его сплавах).

**Релаксационные и динамические явления.** Намагничивание парамагнетика в поле *H* происходит в результате процессов продольной и поперечной магн. релаксации. Первая устанавливает равновесное значение проекции *M* на направление *H*, вторая ведёт к затуханию нестационарной ортогональной компоненты намагниченности. Продольная релаксация обусловлена взаимодействием микроскопич. магн. моментов с тепловым движением среды. Время продольной релаксации  $\tau_1$  обычно составляет  $10^{-10}$ — $10^{-4}$  с при 300 К и растёт с понижением темп-ры. Время поперечной релаксации  $\tau_2$  в парамагн. металлах и жидкостях мало отличается от  $\tau_1$ , однако в твёрдых диэлектриках, как правило,  $\tau_2 \ll \tau_1$ . В последнем случае поперечная релаксация обусловлена взаимодействиями в системе микроскопич. магн. моментов и ведёт к установлению в ней внутр. квазиравновесия, характеризуемого, в общем, двумя *спинсовыми температурами*. Одна из них служит мерой упорядоченности моментов  $\mu$  во внеш. поле *H*, а другая — мерой их взаимной упорядоченности (ближнего порядка).

Процессы магн. релаксации существенно влияют на динамич. восприимчивость парамагнетика  $\chi(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)$  — комплексную величину, характеризующую линейный отклик намагниченности на малое гармонич. изменение внеш. поля с частотой  $\omega$ . Типичные частотные зависимости компонент продольной восприимчивости  $\chi'(\omega)$ , измеряемой в направлении *H*, показаны на рис. 2. Дополнит. особенности на этих кривых могут возникать от вклада т. н. адiabатич. восприимчивости, к-рая связана с взаимодействиями между магн. моментами. Кривые  $\chi(\omega)$  исполь-

зуются для измерения времён магн. релаксации (метод Гортера). Поперечная по отношению к *H* дипляч. восприимчивость  $\chi_{\perp}(\omega)$  обнаруживает резонансные пики на высоких частотах, соответствующих распределению уровней энергии в магн. поле (см. *Магнитный резонанс*). Воздействие на твёрдый парамагнетик поперечным ВЧ-полем вблизи резонанса может усиливать ближний порядок в парамагнитной системе, что в свою очередь ведёт к росту  $\chi_{\perp}(\omega)$  (эффект усиленной восприимчивости).

Изучение П. статич. и динамич. методами даёт ценную информацию о магн. моментах частиц, их анизотр. спектрах и взаимодействиях, о тонких деталях внутр. структуры веществ. П. используется в методах *магнитного охлаждения* до сверхнизких темп-р, в квантовой электронике (см. *Мазер*) и др. См. также *Электронный парамагнитный резонанс, Ядерный магнитный резонанс*.

Лит.: Воксовский С. В., Магнетизм, М., 1971; Кричичи Г. С., Физика магнитных явлений, 2 изд., М., 1985; Альтшуллер С. А., Козырев В. М., Электроны парамагнитных резонанс соединений элементов промежуточных групп, 2 изд., М., 1972; Абрагам А., Гольдман М., Ядерный магнетизм: нордик и беснордик, пер. с англ., т. 1—2, М., 1984.

**ПАРАМАГНЕТИК** — магнетик с преобладающим парамагнетизмом и отсутствием магнитного атомного порядка. П. намагничивается в направлении внеш. магн. поля, т. е. имеет положит. *магнитную восприимчивость*, к-рая в слабом поле при не очень низкой темп-ре (т. е. вдали от условий магн. насыщения или проявления *Де Хааса — ван Альфена эффекта*) не зависит от напряженности поля. Поскольку свободная энергия П. повышается в магн. поле, при наличии градиента поля он втягивается в область с более высоким значением напряженности магн. поля. Конкуренция диамагнетизма, появление дальнего магн. порядка или сверхпроводимости ограничивают область существования вещества в парамагн. состоянии.

П. содержит по крайней мере один из перечисленных ниже типов носителей парамагнетизма.

а) Атомы, молекулы или ионы с нескомпенсиров. магнитными моментами в основном или возбужденном состоянии с энергией возбуждения  $\epsilon_i \ll kT$ . П. этого типа обладают ориентал. ланжевенским парамагнетизмом, зависящим от темп-ры *T* по *Кюри закону* или *Кюри — Вейса закону*, в них возможно магн. упорядочение. [Подохожий по проявлениям магнетизм неоднородных систем малых ферро- или ферримагн. одномоментных частиц (кластеров) в жидкостях или твёрдых матрицах выделен в особый вид — *суперпарамагнетизм*.]

Этот тип носителей присутствует в парах металлов нечётной валентности (Na, Tl); в газе молекулы O<sub>2</sub> и NO; в нек-рых органич. молекулах со свободными радикалами; в солях, оксидах и др. диэлектрич. соединениях 3d-, 4f- и 5f-элементов; в большинстве редкоземельных металлов.

б) Те же частицы, имеющие орбитальный магн. момент в возбужденном состоянии с энергией возбуждения  $\epsilon_i \gg kT$ . Для таких П. характерен не зависящий от температуры поляризационный *ванфлеховский парамагнетизм*.

Этот тип носителей парамагнетизма проявляется в нек-рых соединениях d- и f-элементов (соли Sm и Eu и др.).

в) Коллективизиров. электроны в частично заполненных энергетич. зонах. Им присущ сравнительно слабо зависящий от темп-ры спиновый *Паули парамагнетизм*, как правило, усиленный межэлектронными взаимодействиями. В d-зонах спиновый парамагнетизм сопровождается заметным ванфлеховским парамагнетизмом.

Подобный тип носителей преобладает в щелочных и щелочноземельных металлах, d-металлах и их интерметаллич. соединениях, актиноидах, а также в хорошо

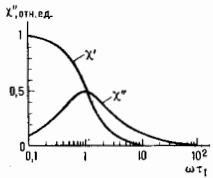


Рис. 2. Типичная частотная зависимость продольной динамической восприимчивости  $\chi'$  парамагнетика.

Вещество	$\chi \cdot 10^6$	Вещество	$\chi \cdot 10^6$
O <sub>2</sub>	3398	Li	24,6
NO	1481	Ca	44,0
FeCl <sub>2</sub>	14750	Al	16,3
EuCl <sub>2</sub>	26500	Pt	189,0
UF <sub>6</sub>	43	U	414,0

проводящих ион-радикальных органич. солах.

Численные значения восприимчивости  $\chi$  нек-рых Л. при нормальных условиях даны в таблице (в ед. СГС на 1 моль вещества). — *И. В. Свечкарёв*.

**ПАРАМЕТР ДЕФОРМАЦИИ ЯДРА** — см. в ст. *Деформированные ядра*.

**ПАРАМЕТР ПОРЯДКА** — термодинамич. величина, характеризующая дальний порядок в среде, возникающий в результате спонтанного нарушения симметрии при фазовом переходе. Равновесный П. п. равен нулю в неупорядоченной фазе и отличен от нуля в упорядоченной. При фазовом переходе 2-го рода П. п. непрерывно возрастает от нулевого значения в точке перехода, а при переходе 1-го рода сразу принимает конечное значение. Если переход происходит на неупорядоч. состоянии с группой симметрии  $G$  в упорядоченное состояние с пониженной группой симметрии  $H \subset G$ , то П. п. в равновесии инвариант относительно преобразований из группы  $H$ , но преобразуется по представлению группы  $G$ , отличному от единичного. Вблизи точки фазового перехода 2-го рода  $T_c$ , где П. п. мал, он преобразуется по одному из неприводимых представлений группы  $G$ ; вклад остальных представлений, согласно Ландау теории, мал по параметру  $\tau = 1 - T/T_c$ .

**Параметры П. п.:** 1). Отклонение зависящей от координат плотности атомов в кристалле от её ср. значения преобразуется под действием общей группы трансляций и пространственных вращений, входящих в группу симметрии  $G$  изотропной жидкости, но остаётся инвариантным относительно преобразований из пространственной группы симметрии кристалла. 2). Аннизотропная часть тензора диэлектрич. проницаемости в жидкой кристалле преобразуется под действием группы пространственных вращений как симметричный тензор с нулевым следом. 3). Магнитичность в ферромагнетике преобразуется как вектор при вращениях подсистемы спинов и меняет знак при обращении времени. 4). Волновая ф-ция  $\Psi$  бозе-конденсата в сверхтекучем <sup>4</sup>He (см. *Гелий жидкий*, *Сверхтекучесть*) преобразуется под действием калибровочного преобразования группы  $U(1)$ , входящей в группу  $G$  изотропной жидкости:  $\Psi \rightarrow \Psi \exp(i\varphi)$ . 5). Комплексная матрица  $A_{\alpha\beta}$  в сверхтекучем <sup>3</sup>He преобразуется как вектор по второму индексу при пространственных вращениях, как вектор по первому индексу при спиновых вращениях, умножается на  $\exp(i\varphi)$  при калибровочных преобразованиях, переходит в комплексно сопряжённую матрицу при обращении времени и меняет знак при пространственной инверсии. Согласно теории Ландау, равновесное значение П. п. вблизи фазового перехода 2-го рода находит, минимизируя ф-цию  $G$  на  $G$  и на  $G$  и на  $G$  — Ландау, инвариантный относительно преобразований из группы  $G$ .

Врождение в упорядоченных фазах. Под действием преобразований из группы  $G$ , де входящих в подгруппу  $H$ , П. п., а вместе с ним и состояние системы изменяется без изменения энергии. Т. о., в упорядоченной фазе имеется вырождение равновесных состояний. Совершенство  $R$  всех таких равновесных состояний образует фактор-пространство  $R = G/H$ . В случае ферромагнетика  $R$  является сферой радиуса  $M$ , на к-рой принимает свои значения равновесная намагниченность  $M$ . В сверхтекучем <sup>4</sup>He область  $R$  является окружностью, соответствующей значениям фазы  $\varphi$  волновой ф-ции  $\Psi$ . Жёсткость упорядоченного состояния приводит к появлению коллективных возбуждений — колебаний П. п. вблизи любого из его равновесных значений. Особенно выделяются т. н. *голдстоуновские моды*, частота к-рых обращается в нуль в предельно бесконеч-

ной длины волны. При этих колебаниях Л. п. не выходит за рамки пространства  $R$ . Число голдстоуновских мод обычно совпадает с размерностью пространства  $R$ . Напр., *второй звук* в сверхтекучем <sup>4</sup>He — колебания фазы  $\varphi$ , *спиновые волны* в ферромагнетике — колебания направления намагниченности.

**Неоднородные состояния П. п.** Непрерывное вырождение равновесных состояний упорядоченных фаз приводит к появлению состояний, в к-рых П. п. зависит от координат. Такие неоднородные состояния можно создавать при помощи внеш. полей, они могут существовать и в виде метастабильных дефектов структуры, таких, как *квантовые вихри* в сверхтекучем <sup>4</sup>He, *дислокации* в кристаллах, доменные стенки в ферромагнетиках, *дислокации* в жидких кристаллах, *солитоны* в сверхтекучем <sup>3</sup>He, *вихри* Абрикосова в *сверхпроводниках* и др. Их устойчивость связана с топологией пространства  $R$  и обеспечивается наличием сохраняющихся т. н. топологич. инвариантов, или топологич. зарядов (т. н. топологич. устойчивость). Напр., топологич. заряд квантового вихря в <sup>4</sup>He равен числу обходов фазой  $\varphi$  окружающей  $R$  при обходе вокруг вихря; это совпадает с числом квантов циркуляции сверхтекучей скорости вокруг вихря. Сложение топологич. зарядов подчиняется групповому закону. Напр., в сверхтекучем <sup>4</sup>He при слиянии двух одинаковых вихрей с топологич. зарядами  $\pm 1$  возникает вихрь с топологич. зарядом 2; в сверхтекучем <sup>3</sup>He при слиянии двух одинаковых вихрей может возникнуть состояние с топологич. зарядом 0.

**Лит.:** Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., *Статистическая физика*, ч. 3, изд. М., 1976; Паташинский А. З., Покровский В. Л., *Флуктуационная теория фазовых переходов*, 2 изд., М., 1982; Воловик Г. Е., Мищенко В. П., *Физика и теория*, М., 1980. **Г. Е. Воловик**.

**ПАРАМЕТР УДАРА** — см. *Приспанный параметр*.  
**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ** — генерация и усиление эл.-магн. колебаний за счёт работы, совершаемой внеш. источниками при периодич. изменении во времени реактивных параметров колебат. системы (ёмкости  $C$  и индуктивности  $L$ ), П. г. и у. э. к. основаны на явлении *параметрического резонанса*.

Простейший параметрич. генератор представляет собой колебат. контур, в к-ром  $C$  или  $L$  меняются периодически около нек-рых ср. значений  $C_0$  и  $L_0$  с частотой  $\omega_n \approx 2\omega_0$ , где  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_0 C_0}$  — частота собств. колебаний контура с пост. параметрами. Если, напр., ёмкость изменяется sinusoidalно:

$$C(t) = C_0(1 + m \cos \omega_n t), \quad (*)$$

где  $m = (C_{\max} - C_{\min}) / (C_{\max} + C_{\min})$  — глубина модуляции ёмкости, то при  $m > m_n \approx 2/Q$  ( $Q \gg 1$  — добротность контура) энергетич. потери за период колебаний меньше энергии, поступающей от накачки, и в контуре в результате неустойчивости возникает самовозбуждение колебаний с последующим установлением стационарного режима генерации (м.я. г. к. и режим возбуждения). При значит. отстройке  $\omega_n$  от значения  $2\omega_0$  (выход из зоны генерации) самовозбуждения не происходит, но при определённых условиях внеш. возбуждение контура достаточно сильным сигналом приводит к установлению незатухающих колебаний (ж.э. с. т. к. и режим возбуждения).

**«Недовозбуждённый» контур**, в к-ром параметрич. накачка энергии несколько меньше её потерь ( $m < m_n$ ), может быть использован как параметрич. усилитель. Действие накачки при этом в среднем эквивалентно уменьшению потерь, в результате чего амплитуда вынужденных колебаний от внеш. источника (сигнала) возрастает и мощность  $P_{\text{вых}}$ , выделяемая в нагрузку, может превышать входную мощность сигнала  $P_{\text{вх}}$ , поступающую в контур. Макс. значение коэф. усиления  $K = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$  в одноконтурном параметрич. усилителе равно  $1/(1 - m/m_n)^2$ . При  $m \rightarrow m_n$  усиление неограниченно растёт, усилит. пр. уменьшается в генератор. Не-

достаток такого усилителя заключается в зависимости коэф. усиления от фазы усиливаемого сигнала по отношению к фазе накачки, изменяющей ёмкость.

От этого последнего недостатка свободны двухконтурные усилители (рис.), где по закону (\*) изменяется,

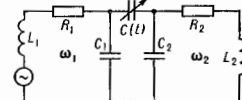


Схема двухконтурного параметрического усилителя.

напр., ёмкость связи  $C_{св}(t)$  между контурами, а частоты нормальных колебаний  $\omega_1$  и  $\omega_2$  удовлетворяют соотношению  $\omega_n = \omega_1 \pm \omega_2$ . Если связь между контурами слабая, то значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  близки к собств. частотам контуров.

Один из них настраивается на частоту входного сигнала, а другой («холостой») — на разностную частоту  $\omega_n = \omega_1 - \omega_2$ . Входное сопротивление (нагрузка) может быть включено как в первый контур (усиление на частоте сигнала), так и во второй (усиление с преобразованием частоты). Коэф. усиления в обоих случаях пропорц.  $1/(1 - m/m_*)^2$ , где теперь  $m_* = \sqrt{C_1 C_2 / C_{св} Q_1 Q_2}$  ( $C_1, C_2$  — ёмкости контуров), и при  $m \rightarrow m_*$ , как и в одноконтурном усилителе, наступает самовозбуждение (регенеративный усилитель).

В др. случае, когда «холостой» контур настраивается на суммарную частоту  $\omega_n = \omega_1 + \omega_2$ , самовозбуждение невозможно; энергия сигнала и накачки преобразуется в энергию колебаний на частоте  $\omega_2$ , и в результате возможно усиление колебаний, снимаемых со второго контура, по сравнению с входным сигналом. Такой регенеративный усилитель-преобразователь имеет сравнительно небольшой коэф. усиления, однако его достоинства являются устойчивостью и широкостью. В двухконтурных усилителях обоих типов фаза колебаний в «холостом» контуре автоматически устанавливается оптимальной для усиления, так что коэф. усиления не зависит от фазы входного сигнала.

Возможность создания параметрич. генераторов и усилителей эл.-магн. колебаний была высказана в 1931 — 1933 Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. Они разработали параметрич. машины (ёмкостные и индуктивные), преобразующие механич. энергию в электрическую за счёт изменений  $C$  или  $L$  механич. способом (при вращении вала), приводящих к параметрич. генерации. Однако практич. применение параметрич. устройства получили начиная с 50-х гг., когда появились полупроводниковые параметрич. диоды, ёмкость к-рых зависит от приложенного запирающего напряжения, и были изучены свойства сегнетоэлектриков (конденсатор с сегнетоэлектриком позволяет получить переменную ёмкость), а также ферритов и сверхпроводников (на основе к-рых может быть создана переменная индуктивность). Периодич. изменение параметров достигается подключением к системе источника накачки с частотой  $\omega_n$ .

Примером параметрич. генератора является и параметрон, в к-ром используется то обстоятельство, что в зависимости от фазы нач. возмущения в одноконтурном параметрич. генераторе возможно возбуждение колебаний с одинаковыми амплитудами, но различающихся по фазе на  $\pi$ . Т. о., простейший параметрон «запоминает» фазу поступающего на него сигнала в двойном коде и может быть использован в качестве элемента вычислит. устройств. Кроме того, параметрич. генераторы могут использоваться как делители частоты: в одноконтурном — возбуждаются колебания с частотой  $\omega_n/2$ , а в двухконтурном возможны режимы, когда частота одного из генерируемых колебаний равна  $\omega_n/n$ , где  $n$  — достаточно большое целое число.

В высокочувств. приёмных устройствах СВЧ-диапазона, используемых в системах радиолокации, радиостроении, космич. связи и др., применяются

двухконтурные параметрич. усилители, обладающие низким уровнем собств. шумов. Причина малости шумов в том, что в них для усиления используются реактивные, в принципе лишённые шумов, элементы, тогда как в реальных (ламповых, транзисторных) усилителях активный элемент неизбежно создаёт тепловые шумы, согласно *Найквиста формуле*. Параметрич. системы применяются также для умножения частоты и генеродирования сигнала. В качестве колеб. систем в СВЧ-диапазоне используются объёмные резонаторы и элементы волноводной техники, а в качестве переменных ёмкостей — высокочастотные параметрич. диоды. Для дополнит. снижения собств. шумов используется охлаждение до темп-р жидкого гелия. Иногда применяются параметрич. усилители бегущей волны в виде цепочки резонаторов с параметрич. диодами, по к-рой распространяется сигнал. При надлежащей настройке резонаторов можно получить усиление в широкой полосе частот. Существуют также электронно-лучевые параметрич. усилители, в к-рых усиление сигнала достигается модуляцией электронного пучка.

В оптич. диапазоне частот для создания параметрич. генераторов и усилителей используются среды, параметрич. к-рых изменяются полем бегущей или стоячей волны накачки. В частности, если диэлектрич. проницаемость среды  $\epsilon$  изменяется по закону

$$\epsilon(r, t) = \epsilon_0[1 + m \cos(\omega_n t - k_n r)],$$

где  $r$  — радиус-вектор точки, то возможно усиление или генерация пары волн с частотами  $\omega_1, \omega_2$  и волновыми векторами  $k_1, k_2$ , если выполняются условия фазового синхронизма  $\omega_n = \omega_1 \pm \omega_2, k_n = k_1 \pm k_2$ . На этом основан принцип действия параметрич. генератора света.

Лит.: Дж и с е л л У., Связанные и параметрические колебания в электронике, пер. с англ., М., 1965; З и т и в С. Г е р ш е н з о н Е. М., Параметрические системы СВЧ на полупроводниковых диодах, М., 1964; К а н л а п А. Е., К р а в ц о в Ю. А., Р ы н о в В. А., Параметрические генераторы и делители частоты, М., 1966; Основы теории колебаний, 2 изд., М., 1988. Л. А. Осиповский, Н. С. Степанов. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ И ПРИЕМНИКИ ЗВУКА — устройства, основанные на использовании эффекта генерации комбинац. тонов при взаимодействии звуковых волн, в к-рых роль излучающей (приёмной) антенны играет область среды, где происходит нелинейное взаимодействие волн.

В параметрич. излучателе в одном случае — две ВЧ-волны (т. е. компоненты волны накачки), взаимодействуя друг с другом, порождают волну разностной частоты, излучаемую из области взаимодействия; в другом — модулированная по амплитуде или частоте ВЧ-волна накачки в результате детектирования средней возбуждает НЧ-волну на частоте модуляции. Область нелинейного взаимодействия является своеобразной «бестелесной» антенной, размеры к-рой определяют характеристику направленности излучателя. Поэтому даже при малых размерах излучателей волны накачки удаётся получить остронаправленное НЧ-излучение. Наряду с высокой направленностью достоинство параметрич. излучателя — отсутствие боковых лепестков диаграммы направленности в широкости; для существенного относительного изменения частоты излучения достаточно весьма незначительного изменения частоты накачки (в пределах шарниры полосы резонансного излучателя волны накачки). Осн. недостаток параметрич. излучателя — его невысокая эффективность: доля энергии накачки, идущая на НЧ-излучение, обычно невелика и зависит от соотношения частот получаемой волны  $\omega_n$  и накачки  $\omega_n$ . Для оптимального режима отношение мощности НЧ-излучения  $W_n$  к мощности накачки  $W_n$  определяется ф-лой

$$W_n/W_n \approx 1/8(\omega_n/\omega_n)^2.$$

Процесс генерации волны разностной частоты происходит по-разному, в зависимости от геом. параметров зоны взаимодействия волн накачки. Для плоского

излучателя волны накачки можно выделить два предельных случая.

1) Нелинейное взаимодействие происходит в ближней зоне излучения волны накачки (см. *Звуковое поле*), где она является плоской. Протяжённость зоны взаимодействия в направлении распространения волны в этом случае определяется длиной пробега волны накачки  $l = \alpha^{-1}$ , где  $\alpha$  — коэф. поглощения этой волны, а поперечное сечение этой зоны — площадью излучателя волны накачки (рис. 1). Амплитуда  $p_s$  НЧ-волны



в дальней зоне пропорц. длине  $l$  зоны взаимодействия. Для накачки в виде двух ВЧ-волн близкой частоты она выражается ф-лой

$$P_s = \frac{\epsilon r_0^2 k_2 \omega_1^3}{8 \rho c^2 \alpha r} DW(\theta). \quad (1)$$

Здесь  $\epsilon$  — нелинейный параметр среды,  $p_n$  — амплитуда волн накачки,  $k_2 = \omega_2/c$ ,  $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$  — частота излучаемой НЧ-волны;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — частоты компонент волны накачки;  $a$  — радиус ВЧ-лучка, определяемый размером излучателя волны накачки,  $\rho$  — плотность среды,  $c$  — скорость звука в ней,  $r$  — расстояние от излучателя волны накачки до точки наблюдения,  $DW(\theta)$  — диаграмма направленности для НЧ-волны, описываемая выражением

$$DW(\theta) = \left[ 1 + k_2^2 \alpha^{-2} \sin^2(\theta/2) \right]^{-1/2}. \quad (2)$$

Угол  $\theta$  отсчитывается от оси области взаимодействия; характерная ширина диаграммы направленности, согласно (2),  $\theta_m \approx (k_2 \alpha^{-1})^{-1/2}$ . Ф-ла (1) описывает два эффекта: образование тона разностной частоты при взаимодействии плоских волн на длине  $l = \alpha^{-1}$  (множитель  $\epsilon r_0^2 k_2 / \rho c^2 \alpha$ ) и диффракц. эффект при излучении волны излуч. разностной частоты из цилиндрич. области взаимодействия с малым поперечным сечением, характеризующимся параметром  $k_2 a^2 / r$ .

2) Гл. вклад в генерацию НЧ-волны даёт нелинейное взаимодействие в дальней зоне излучения волны накачки, где она становится расходящейся и область взаимодействия имеет форму рупора (рис. 2). При этом НЧ-



излучение как бы «вписывается» в диаграмму направленности волны накачки с характерной шириной  $(ka)^{-1}$ , где  $k = \omega_1/c$ ,  $k$  — волн. к-ва и определяет направленность НЧ-излучения. Волна разностной частоты возникает как результат взаимодействия расходящихся волн. Влияние диффракц. эффектов в этом случае не проявляется, поэтому преобразование ВЧ-излучения в низкочастотное происходит более эффективно. Амплитуда НЧ-волны пропорц. первой степени волнового числа  $k_2$ , а не квадрату, как в первом предельном случае:

$$P_s = \frac{\epsilon r_0^2 p_n^2 k_2}{16 \rho c^2 r} \ln(R\alpha)^{-1} D^2(\theta).$$

Здесь  $R = ka^2/2$  — длина ближней зоны для волны накачки, а диаграмма направленности имеет вид

$$D(\theta) = J_1(k_2 \sin \theta) / k_2 \sin \theta$$

( $J_1$  — ф-ция Бесселя 1-го рода 1-го порядка). Амплитуда  $p_s$  излучаемой НЧ-волны как в первом, так и во втором случае растёт пропорц. квадрату амплитуды волн накачки.

При больших интенсивностях волны накачки она трансформируется в плоскообразную волну, возрастает её поглощение и работа параметрич. излучателя переходит в нелинейный режим. Длина пробега волны накачки определяется теперь нелинейным поглощением звука и равна  $l_n = (\epsilon k_p \rho c^2)^{-1}$ . Если взаимодействие плоскообразных волн происходит в основном в ближней зоне (цилиндрич. антенна, рис. 1), то амплитуда излучаемой НЧ-волны в дальней зоне выражается ф-лой

$$P_s = \frac{p_n^2 k_2 \omega_1}{2 r \omega_n},$$

а ширина диаграммы направленности определяется, как и в линейном режиме, длиной зоны взаимодействия:  $\theta \approx (k_2 l_n)^{-1/2}$ . При взаимодействии в дальней зоне (рис. 2)

$$P_s = \frac{p_n k_2 r^2}{2 r}, \quad \theta_m \approx (ka)^{-1}.$$

Т. о., в нелинейном режиме работа параметрич. излучателя амплитуда  $p_s$  НЧ-волны не зависит от нелинейного параметра среды  $\epsilon$  и пропорц.  $p_n$ .

В параметрич. приёмнике к-ва гармоник. ВЧ-пучок (волна накачки) модулируется принимаемым НЧ-сигналом, в результате чего из-за нелинейных свойств среды возникают комбинац. частот, обладающие высокой направленностью, к-рые регистрируются ВЧ-

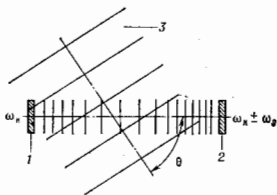


Рис. 3. Схема параметрического приёмника звука. 1 — излучатель волны накачки; 2 — приёмник звука; 3 — комбинационный сигнал.

приёмником звука (рис. 3). Амплитуда  $P_R$  комбинационного тона частоты  $\omega_k$  равна:

$$P_R = P_n \left[ \epsilon - 2 \sin^2(\theta/2) \right] \frac{p_n k_2 L \sin \delta}{\rho c^2 L \sin \delta},$$

где  $\delta = k_2 L \sin^2(\theta/2)$  — частота  $\omega_k = \omega_n \pm \omega_s$ ,  $p_n$  и  $\omega_n$  — амплитуда и частота волны накачки,  $p_s$  и  $\omega_s$  — амплитуда и частота НЧ-сигнала,  $k_2 = \omega_2/c$ ,  $k = k_2/c$ . Ширина диаграммы направленности параметрич. приёмника  $\theta_m \approx (k_2 L)^{-1/2}$ , где  $L$  — длина области взаимодействия, определяемая расстоянием между излучателем и приёмником ВЧ-волны накачки; угол  $\theta$  отсчитывается от оси волнового пучка накачки. Осн. достоинством параметрич. приёмника является возможность реализации достаточно длинных областей взаимодействия, что позволяет получить острую направленность при приёме НЧ-звука.

Параметрич. излучатели применяются в калибровочных лаб. установках, в измерит. гидроакустич. бассейнах как широкополосные излучатели для калибровки приёмников звука. Частота накачки в таких устройствах  $\sim 1$  МГц, частота излучения 1–100 кГц, амплитуда сигнала  $\sim 10$  Па·м, радиус излучателя составляет неск. см, мощность накачки — десятки Вт. Более мощные и более низкочастотные параметрич. излучатели применяются в *гидроакустике* для прецизионного профилирования дна, зондирования придонных областей, излучения звуко рассеивающих слоёв,

турбулентности, определения толщины слоя клиа, порока предметов в морском грунте, а также в *атмосферной акустике* для зондирования атмосферы, в частности для контроля стенки турбулентности на взлетных траекториях самолетов. Частота накачки в таких излучателях составляет 25—50 кГц, частота излучения 0,5—15 кГц, ширина диаграммы направленности — неск. градусов, мощность накачки  $10^2$ — $10^4$  кВт, амплитуда сигнала  $\sim 10^2$  Па·м, размер излучателя  $\sim 10^2$  см. Параметрич. излучатели применяются также в рыбопромысловом аппаратуре, эхолотах и т.д., где характеристики их излучения и размеры определяются исходя из поставленной задачи.

Лит.: Наугольдык К. А., Островский Л. А., Суткин А. М., Параметрические излучатели звука, в кн.: Нелинейная акустика, Горный, 1980; Нойков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И., Нелинейная гидродинамика, Л., 1981; Наугольдык К. А., Островский Л. А., О нелинейных эффектах в акустике океана, в кн.: Акустика океана, М., 1982. К. А. Наугольдык.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ** — колебательные и волновые системы с меняющимися во времени «энергетическими» параметрами, изменение к-рых связано с совершением работы. Таковы длина маятника, натяжение струны, ёмкость или индуктивность эл.конт. контура и др. В П. к. с. меняются энергия колебаний (волн), а также собств. частота колебат. системы или скорость распространения волн.

Различают резонансные и нерезонансные П. к. с. В резонансных — параметры меняются периодически, с периодом, находящимся в определенном целочисленном соотношении с периодом собств. колебаний или волн в системе. Это может приводить к эффектам раскачки поля из-за накапливающейся передачи энергии системе в такт с её колебаниями (см. *Параметрический резонанс*). Это явление используется для усиления и генерации колебаний и волн (см. *Параметрическая генерация и усиление электромагнитных колебаний, Параметрический генератор света*).

К нерезонансным П. к. с. относятся, напр., системы с медленно (по сравнению с характерным периодом колебаний или волн) меняющимися параметрами. При этом в недиссиплятивных (лагранжевых) системах сохраняются т. н. *адиабатические инварианты*; к ним относится, в частности, отношение энергии колебаний в осцилляторе или волной энергии волновой группы (пакета) к частоте, имеющее смысл числа квантов (кванта частиц).

К резонансным П. к. с. можно отнести также системы с резким, скачкообразным изменением параметров, напр. среды с движущимися границами, в к-рых при отражении и преломлении происходит изменение частоты (в соответствии с *Доплера эффектом*) и энергии волн. Однако, если скачки параметра периодически повторяются, в системе возможны эффекты параметрич. резонанса.

Л. А. Островский.  
**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ** — неустойчивости колебат. систем и нелинейной волновой среды, возникающие в результате пространственно-временной модуляции параметров, характеризующих собств. колебания системы или среды. В случае нелинейной волновой среды модуляция совершается волнами конечной амплитуды — волнами накачки. П. н. обычно имеют пороги по амплитудам волн накачки  $\epsilon$ . Если  $\epsilon$  превышает определенное пороговое значение, то собств. мода начинает расти с теплового уровня, поглощая энергию волн накачки. При пространственно-временном резонансе возникает т. н. распадная П. н. даже при небольших амплитудах волн накачки, но больше пороговой. При больших амплитудах накачки может возникнуть нерезонансная мода в случае, когда одна из волн, образующихся при распаде, не существует в среде в отсутствие накачки. Примером типичной нерезонансной П. н. является модуляция дробная неустойчивость. Другим примером может служить ситуация, когда одна из волн,

возникающих в результате распада, сильно затухает, а вторая волна не затухает. К П. н. относят и неустойчивость модифициров. расп. а — аperiodич. неустойчивость, возникающую также при больших амплитудах  $\epsilon$  и определенному соотношению волновых векторов  $k$  и  $k_0$ , и *эрмывной неустойчивость волн*, возникающую в средах, где имеются волны с отрицат. энергией. Важную роль в параметрич. процессах в высокотемпературной плазме играет т. н. тепловая П. н.

Резонансная неустойчивость. В простейшем случае, когда можно пренебречь влиянием волн накачки на собств. частоты среды, условия резонанса имеют вид

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2; \quad \mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2; \quad l = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $\omega_0, \mathbf{k}_0$  — частота и волновой вектор волны накачки, а  $\omega_1, \mathbf{k}_1, \omega_2, \mathbf{k}_2$  — соответствующие величины для волн, возбуждаемых при неустойчивости. В случае  $l = 1$  имеет место резонанс с основной гармоникой волны накачки; при  $l = 2, 3, \dots$  — резонанс с кратными гармониками. Неустойчивости, определяемые (1), наз. *распадными* в связи с тем, что соотношения (1) при умножении на  $h$  совпадают с условиями сохранения энергии и импульса при распаде квазичастиц—волн ( $\omega_0, \mathbf{k}_0$  или гармоник) на две волны-квазичастицы ( $\omega_1, \mathbf{k}_1; \omega_2, \mathbf{k}_2$ ). Первым теоретически предсказанным и детально исследованным в 1962 типом распадающей П. н. явилась неустойчивость лентиморовской волны (распадающейся на лентиморовскую и ионо-звуковую:  $l = l' + s$ ). Распадная П. н. лежит также в основе вынужденного комбинац. рассеяния (см. *Вынужденное рассеяние света*) и определяет его особенности. К ним относится экспоненциальное (а не линейное!) нарастание амплитуд не только рассеянной, но и падающей волн. Это является прямым следствием положения, обратной связи рассеянной и падающей волн, распространяющихся на фоне волны накачки. Ур-ния, описывающие такую связь, можно интерпретировать как пространственно-временное обобщение *Хилла уравнений*, в простейшем случае — ур-ния Матё для параметрич. резонанса осцилляторов. Для волновой среды, такой, как плазма, однородной (по  $x$ ) аналог ур-ния Матё (см. *Матё функции*) имеет вид

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \nabla_{\perp}^2 [1 + \epsilon \cos(\omega_0 t - k_0 x)] \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0, \quad (2)$$

где  $\psi$  — величина, описывающая волну (напр., потенциал эл.конт. поля),  $v_{\phi}$  — фазовая скорость волны в среде при отсутствии волн накачки,  $\epsilon$  — амплитуда волн накачки и отнорм. единица. Подобно тому как в ур-ния Матё описывается временная модуляция частоты осциллятора, здесь описывается пространственно-временная модуляция фазовой скорости волн. Чтобы найти условия параметрич. возбуждения пары элементарных волн, удобно перейти к Фурье-компонентам по пространству, переменным:

$$v_k = \int \psi(x) \exp(ikx) dx.$$

Тогда ур-ние (2) переходит в систему ур-ний для связанных гармонич. осцилляторов:

$$\frac{d^2 v_k}{dt^2} + \omega^2(k) v_k = -\frac{\epsilon}{2} (k_0 - k_1) v_{\phi}^* v_{k_0 - k_1} \times \\ \times \exp(-i\omega_0 t) - \frac{\epsilon}{2} (k_0 + k_1) v_{\phi}^* v_{k_0 + k_1} \exp(-i\omega_0 t), \quad (3)$$

где осциллятор  $v_k$  связан с осцилляторами  $v_{k_0 \pm k_1}$ , т. е.  $k$ ; при этом правую часть (3) можно рассматривать как зависящую от времени вынуждающую силу. Если амплитуда  $\epsilon$  мала ( $\epsilon \ll 1$ ), то возникает слабая связь осцилляторов  $v_k, v_{k_0 \pm k_1}$  и т. д., не меняющая существенно частоту осцилляторов, к-рые осциллируют с собств. частотами  $\omega = \omega(k)$ . Однако если вынуждающая сила попадает в резонанс с собств. частотой осциллятора, то он может возбуждаться. Так, напр.,

если резонансным является первое слагаемое правой части (3), для  $n$ -го условия резонанса имеет вид  $\omega_0 - \omega(k_0 - k_1) = \omega(k_2)$ , то вместо бесконечной системы ур-ний для связанных осцилляторов в первом приближении при малой связи ( $\epsilon \ll 1$ ) получаем укороченную систему для двух осцилляторов  $v_{k_1}$  и  $v_{k_2}$ , связанных условиями резонанса (1) при  $n = 1$ :

$$\begin{cases} \frac{d^2 v_{k_1}}{dt^2} + \omega_1^2(k_1) v_{k_1} = -\frac{\epsilon}{2} k_1^2 \Phi_0^2 \exp(-i\omega_1 t) v_{k_2}^*, \\ \frac{d^2 v_{k_2}}{dt^2} + \omega_2^2(k_2) v_{k_2} = -\frac{\epsilon}{2} k_2^2 \Phi_0^2 \exp(i\omega_2 t) v_{k_1} \end{cases} \quad (4)$$

(\* означает комплексное сопряжение).  
Решение (4) ищется в виде

$$v_{k_i} = a_i(t) \exp(-i\omega_i(k_i)t),$$

где  $a_i(t)$  — медленно меняющиеся амплитуды связанных волн ( $i = 1, 2$ ), тогда:

$$\begin{aligned} -2i\omega_1 \frac{da_1}{dt} &= -\frac{\epsilon}{2} k_1^2 \Phi_0^2 a_2^* \exp(-i\Delta\omega t), \\ -2i\omega_2 \frac{da_2}{dt} &= -\frac{\epsilon}{2} k_2^2 \Phi_0^2 a_1 \exp(i\Delta\omega t), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1 - \omega_2$  — частотная расстройка резонанса при параметрич. связи осцилляторов  $v_{k_1}$  и  $v_{k_2}$ . Решением (5) являются

$$a_1 \sim \exp[-i(\Delta\omega t/2) + \nu t],$$

$$a_2^* \sim \exp[i(\Delta\omega t/2) + \nu t],$$

где

$$\nu = \sqrt{\gamma_D^2 - (\Delta\omega)^2/4},$$

$$\gamma_D^2 \equiv \epsilon^2 k_1^2 k_2^2 \Phi_0^4 / 16\omega_1\omega_2.$$

Это решение описывает распадную параметрич. неустойчивость первого порядка ( $n = 1$ ). При отсутствии частотной расстройки ( $\Delta\omega = 0$ ) амплитуды дублета волн  $a_1$  и  $a_2$  экспоненциально нарастают с инкрементом  $\nu = \gamma_D$ . При этом необходимо выполнение соотношения  $\omega_1\omega_2 > 0$ , что вместе с распадными условиями (1) даёт  $\omega_0 > \omega_1, \omega_2$ . Иными словами, при распадной неустойчивости возбуждаются волны с частотами, меньшими частоты накачки (красные спутники). Неустойчивость развивается при  $\nu > 0$ , т. е. при  $\gamma_D > |\Delta\omega|/2$ . При расстройке  $|\Delta\omega|/2 > \gamma_D$  неустойчивость исчезает. Т. о., область частот  $\Delta\omega$ , где может существовать распадная П. в. (ширина зоны неустойчивости — зоны Матъё), определяется условием  $|\Delta\omega| \leq 2\gamma_D$ . Т. к.  $\gamma_D$  в свою очередь пропорционален амплитуде волны накачки  $\epsilon$ , то и ширина зон неустойчивости пропорциональна  $\epsilon$ . Инкремент неустойчивости  $n$ -го порядка пропорционален  $n$ -й степени амплитуды  $\gamma_n \sim \epsilon^n$ , т. е. при малых амплитудах накачки ( $\epsilon \ll 1$ ) ширина зоны П. в. сужается с ростом  $n$  (рис. 4) пропорц.  $\epsilon^n$ . Поэтому практически важно учитывать неустойчивости

первого порядка, а если для взаимодействующих волн не выполняются условия (1), то — второго порядка.

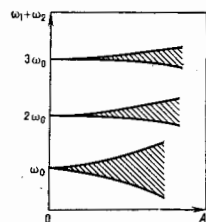


Рис. 1. Зоны распадной параметрической неустойчивости (Матъё зоны) для основной частоты  $\omega_0$  и гармоник ( $n = 1, 2, 3$ ).

Если учесть затухание волн, введя в правые части (5) слагаемые  $-\gamma_1 a_1$  и  $-\gamma_2 a_2$  ( $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — линейные декременты затухания волн), при  $\Delta\omega = 0$  получим для соответствующего инкремента распадной П. в.  $\nu_D$  след. выражение:

$$\nu_D = -\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} + \sqrt{\frac{(\gamma_1 - \gamma_2)^2}{4} + \gamma_D^2}. \quad (6)$$

Из (6) можно получить выражение для порога распадной неустойчивости, определяемое в приближении однородной плазмы декрементами возбуждаемого дублета волн:  $\gamma_{Dпор}^2 = \gamma_1\gamma_2$ , а порог по амплитуде волны накачки  $\epsilon^2 = 16\omega_1\omega_2\gamma_1\gamma_2/k_1^2k_2^2\nu_D^4$ . Из него следует, что при стремлении к нулю хотя бы одного из декрементов затухания дублета связанных волн порог по амплитуде волны накачки исчезает.

В неоднородной плазме при определении порогов распадной П. в. существенную роль играет вынос волн из зоны резонансного взаимодействия, где выполняются условия (1). Это связано с тем, что П. в. относится к классу конвективных, а не абсолютных неустойчивостей.

**Модуляционная неустойчивость.** Если одна из волн возбуждаемого дублета является низкочастотной, то при достаточных амплитудах волн накачки инкремент П. в. формально превышает НЧ, тогда возникает др. разновидность П. в. — модуляц. неустойчивость. Для неё лишь ВЧ близка к частоте собств. колебаний среды, а другая — к вынужденным колебаниям среды, к-рые распространяются с почти групповой скоростью волны накачки. При этом необходимо учитывать кроме собств. моды ( $\omega_1, k_1$ ) нару волн для волновых векторов  $k_{\pm} = k_0 \pm k_1$ . Условие возникновения модуляц. П. в. имеет вид  $\alpha d^2\omega_0/dk_0^2 < 0$ , где  $\alpha$  — коэф. связывающий нелинейный сдвиг частоты волны накачки с квадратом её амплитуды, т. е. с её интенсивностью. Смысл критерия и самой неустойчивости заключается в следующем. Если промодулировалась исходную волну накачки (напр.,  $\alpha > 0$ ), тогда в областях макс. амплитуд (точки A и A', рис. 2) фазовая скорость больше, чем в областях мин. амплитуд (точка B). Это означает рост числа узлов исходной волны при приближении к области мин. амплитуд (область a) и уменьшение числа узлов при удалении от неё (область б), так что если групповая скорость имеет отрицат. производную по  $k$ , то колебания в области a с убывающей амплитудой отступят, а в области с нарастающей амплитудой (область б) убегают вперед, увеличивая тем самым рост амплитуды и углубляя её минимум.

Рассмотрим возникновение модуляц. неустойчивости летгворовских волн в плазме. Она наблюдается в том случае, когда инкремент П. в. волн  $l - l' + s$  превышает частоту ионо-авуковых колебаний. При больших амплитудах накачки медленные колебания плазмы,

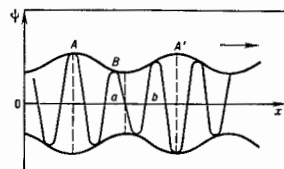


Рис. 2. Развитие модуляционной неустойчивости,  $\psi$  — фаза волны.

созданные конденеромной силой ВЧ-давления, уже не совпадают с ионо-звуковыми колебаниями. При движении на фоне медленно изменяющихся вариаций плотности плазмы мак частота (энергия) плазмонов —

квантов ленгмюровских волн — сохраняется. Из закона дисперсии этих волн

$$\omega(k) = \omega_p \left( 1 + \frac{\delta n}{2n_0} \right) + \frac{3}{2} k^2 v_D^2 \omega_p$$

( $r_D$  — дебаевский радиус экранирования,  $n_0$  — невозможная плотность плазмы,  $\omega_p$  — плазменная частота) следует, что в «справалах» плотности плазмы ( $\delta n < 0$ ) волновое число  $k$  и кинетич. энергия плазмонов возрастают (первое слагаемое можно рассматривать как потенциальную, а второе как кинетич. энергию плазмонов в ед.  $k$ ). Т. о., область пониженной плотности плазмы играет роль потенциальных ям для плазмонов. Это приводит к их локализации в «справалах» плотности, следовательно, к возрастанию силы ВЧ-давления плазмонов в «справалах». Под действием этого давления плазма вытесняется из области локализации плазмонов, углубляя «справал» плотности и тем самым создавая ещё более глубокую яму для плазмонов. Развивается неустойчивость автомодуляции пространственного распределения плазмонов — стягивание их в сгустки — каверны, из к-рых силой ВЧ-давления плазма вытеснена. Локализация эл.эктр. полей в каверне и вытеснение из неё плазмы сопровождаются уменьшением характерного размера каверны и длины волн запертых в ней плазмонов:

$$l \sim 1/k \sim 1/\sqrt{|\delta n|}$$

и как следствие — ещё большей локализацией ленгмюровской энергии. Тогда рост амплитуды поля в каверне и углубление ямы плотности носит характер взрыва  $|\delta n| \rightarrow \infty$ , а  $l \rightarrow 0$ . Это означает, что схлопывание — колд а в каверны — продолжается до тех пор, пока длины запертых в ней плазмонов не достигают малых значений, при к-рых становятся существенной диссипация энергии (напр., *Ландау затухание*) ленгмюровских волн. При коллапсе ВЧ-давление в центре каверны возрастает обратно пропорц. её объёму:  $E \sim 1/l^3$  ( $m = 1, 2, 3$  — размерность каверны). Для вытеснения необходимо преодолеть давление плазмы  $\delta n l$ , вытесняемой из каверны. Газокинетич. давление при коллапсе изменяется  $\sim 1/l^3$ , поэтому в одностороннем случае при нек-ром  $l$  установится баланс давлений и коллапс прекратится. В этих условиях модуляц. неустойчивость приводит к образованию солитонов — сгусткам плотности в ленгмюровском наполнении (см. *Солитон* в плазме).

Аперриодические неустойчивости. При увеличении амплитуды волны накачки необходимо учитывать изменение частот самих собств. волн, в особенности если одна из частот мала в сравнении с частотой исходной волны. Инкременты таких неустойчивостей превышают низкие частоты колебаний, а сама неустойчивость имеет аперриодич. характер. Условия резонанса меняются, однако неустойчивости относятся к тем же зонам Маттьё, что и распадающая П. н., поэтому эти неустойчивости часто наз. неустойч. в о с т и м и м о д и ф и ц и р о в а н н о г о р а с п а д а.

Тепловая П. и. Если нелинейные в диссипативных слагаемых преобладают над стрикционными, то П. н. имеют весьма низкие пороги. Так, в *низкотемпературной плазме* нелинейность в слагаемом, описывающем увеличение темп-ры за счёт джоулева нагрева плазмы, может быть ответственной за возникновение распадающей П. и. и неустойчивости модифицир. распада, наз. также тепловой П. п. Эта неустойчивость играет важную роль в параметрич. нагреве нижней ионосферы и связанном с ним распадении плазмы.

Лит.: Сидя и В. П., Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму, М., 1975; Основы физики плазмы, т. 5, М., 1984.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР — генератор эл.-магн. колебаний, представляющий собой систему, в к-рой колебания возбуждаются и поддерживаются периодически изменением её реактивного параметра (ём-

кости  $C$  или индуктивности  $L$ ). См. также *Параметрическая генерация и усиление электромагнитных колебаний*.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР СВЕТА — источник когерентного оптич. излучения, в к-ром мощная световая волна одной частоты (частоты накачки), проходя через нелинейный кристалл, преобразуется в световые волны других, меньших частот. Частоты параметрически возбуждаемых волн определяются дисперсией света в кристалле и при её изменении могут плохо нестраиваться при фиксиров. частоте накачки.

П. г. с. предложен в 1962 С. А. Ахмазовым и Р. В. Хохловым. Первые эксперим. П. г. с. были созданы в 1965 Дж. Джордмэйном (J. Giordmaine) и Р. Миллером (R. Miller), С. А. Ахмазовым и Р. В. Хохловым с сотрудниками.

Т. к. размеры нелинейного кристалла много больше длины световой волны, то процесс параметрич. возбуждения в оптике носит ярко выраженный волновой характер. Под действием эл.эктр. поля  $E$  световой волны большой интенсивности меняется диэлектрич. проницаемость  $\epsilon$  нелинейного кристалла:  $\epsilon = \epsilon_0 + 4\pi\chi E$ , где  $\chi$  — квадратичная восприимчивость (см. *Нелинейная оптика*). Если поле волны накачки  $E_H = E_H \cos \chi \sin(\omega_H t - k_H x + \varphi_H)$ , где  $k_H = \omega_H/v_H$  — волновое число, а  $\varphi_H$  — нач. фаза, то диэлектрич. проницаемость модулируется по закону бегущей волны:

$$\epsilon = \epsilon_0 [1 + m \sin(\omega_H t - k_H x + \varphi_H)], \quad (1)$$

где  $m = 4\pi\chi E_H/\epsilon_0$  наз. глубиной модуляции, характерная величина к-рой в оптике равна  $10^{-2}$ – $10^{-5}$ . У входной грани кристалла ( $x = 0$ ) с переменной во времени диэлектрич. проницаемостью (1) из шумов возбуждаются эл.-магн. колебания с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и фазами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , связанными соотношениями

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_H, \quad \varphi_H - \varphi_1 - \varphi_2 = \pi/2 \quad (2)$$

аналогично параметрич. возбуждению колебаний в двухконтурной системе (см. *Параметрическая генерация и усиление электромагнитных колебаний*).

Колебания с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , распространяясь в глубь кристалла в виде двух световых волн с волновыми векторами  $k_1$  и  $k_2$ , взаимодействуют с волной накачки. Если не принять спец. мер, то на расстоянии  $x$  оптимальные фазовые соотношения (2) изменятся вследствие дисперсии на величину  $\Delta\varphi = \Delta k x$ , где  $\Delta k = -k_H - k_1 - k_2$  — расстройка волновых векторов, что приводит к ухудшению параметрич. возбуждения или даже его исчезновению. Поэтому необходимым условием эфф. передачи энергии от волны накачки возбуждаемым волнам на всём пути их распространения является согласование их фазовых скоростей, или волновых векторов, т. е.  $\Delta k = 0$ :

$$k_1 + k_2 = k_H. \quad (3)$$

Это условие, наз. условием фазового синхронизма, означает, что волновые векторы волны накачки и синхронно возбуждаемых волн образуют замкнутый треугольник.

При фазовом синхронизме амплитуды возбуждаемых, сначала слабых, волн возрастают с пройденным расстоянием за счёт энергии накачки:

$$E_{1,2} = E_0 \exp[(\Gamma - \delta)x],$$

где  $\delta$  — коэф. затухания волны в линейной среде,  $\Gamma = \chi E_H \epsilon_0^{-1} (\omega_1 \omega_2 / n_1 n_2)^{1/2}$  — коэф. параметрич. усиления. Исчезнув, возбуждение происходит, если поле накачки превышает порог:  $E_{H0} > (\delta \epsilon_0 l) / \chi n_1 n_2 \omega_1 \omega_2$ .

Фазовый синхронизм, обеспечивающий макс. параметрич. усиление, служит своеобразным волновым фильтром, выделяющим из всего многообразия частот  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_H$  опред. пару частот в П. г. с., удовлетворяющую (3). Из (3) следует условие для показателя преломления кристалла на частотах  $\omega_H$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :  $n_H < n_1, n_2$  или  $n_1 < n_H < n_2$ . В кристаллах с нор-



мальной дисперсией, когда показатель преломления увеличивается с ростом частоты  $\omega$ , синхронное параметрич. взаимодействие оптич. волн не осуществимо обычным способом, т. к.  $n_0 > n_1, n_2$ . На практике условие фазового синхронизма может быть осуществлено в анизотропных кристаллах, если использовать зависимость показателя преломления не только от частоты, но и от поляризации волны и направления распространения. Напр., в одноосном отрицат. кристалле показатель преломления обыкновенной волны  $n_o$  больше показателя преломления необыкновенной волны  $n_e$ , к-рый зависит также от направления распространения относительно оптич. оси кристалла (рис. 1). Используя дисперсию анизотропного кристалла, можно подобрать направления, в к-рых выполняется условие фазового синхронизма. В этом случае возможны два типа параметрич. взаимодействия световых волн: первый — возбуждение необыкновенной волной накачки двух обыкновенных волн:

$$2n_e(\omega_H, \theta_c) = n_o(\omega_1) + n_o(\omega_H - \omega_1);$$

второй — возбуждение необыкновенной волной накачки обыкновенной волной частоты  $\omega_1$  и необыкновенной волной частоты  $\omega_2$ :

$$2n_e(\omega_H, \theta_c) = n_o(\omega_1) + n_e(\omega_H - \omega_1, \theta_c).$$

В positif. одноосном кристалле также можно подоб-

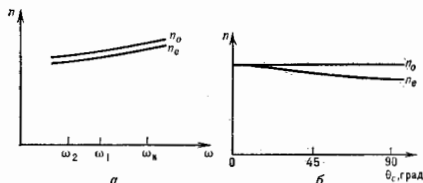


Рис. 1. Зависимости показателя преломления обыкновенной  $n_o$  и необыкновенной  $n_e$  волн от частоты (а) и направления распространения (б) в одноосном отрицательном кристалле.

рять направления, в к-рых выполняется условие (3) и обыкновенной волной накачки возбуждаются две необыкновенные или обыкновенная и необыкновенная волны:

$$2n_o(\omega_H) = n_e(\omega_1, \theta_c) + n_e(\omega_H - \omega_1, \theta_c),$$

$$2n_o(\omega_H) = n_e(\omega_1, \theta_c) + n_o(\omega_H - \omega_1).$$

Угол  $\theta_c$  между направлением волновых векторов и оптич. осью кристалла, наз. углом синхронизма, является ф-цией частот накачки и одной из возбуждаемых волн. Изменяя направление распространения накачки относительно оптич. оси (поворачивая кристалл), можно плавно перестраивать частоту П. г. с. (рис. 2, а). Существуют и др. способы перестройки частоты П. г. с., связанные с зависимостью показателя преломления  $n$  от темп-ры (рис. 2, б), внеш. электр. поля и т. д.

Для увеличения мощности П. г. с. кристалл помещают внутри открытого резонатора, благодаря чему возбуждаемые волны пробегают кристалл многократно за время действия накачки (увеличивается эфф. длина взаимодействия, рис. 3). Перестройка частоты такого резонаторного П. г. с. происходит небольшими скачками, определяемыми разностью частот, соответствующих продольным модам резонатора. На практике используются одрезонаторные П. г. с., в к-рых обратная связь с помощью зеркала резонатора осуществляется только для одной из возбуждаемых волн, и двухрезонаторные П. г. с. с обратной связью на обеих частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Порог самовозбуждения двухрезонаторного

П. г. с. определяется добротностью резонаторов  $Q_1$  и  $Q_2$  на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :  $m > 2\sqrt{Q_1 Q_2}$ . В одрезонаторном П. г. с. порог возбуждения выше:  $m > 8\sqrt{Q_1}$ ,

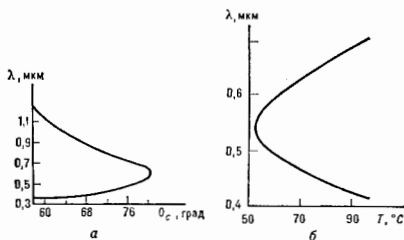


Рис. 2. Зависимость длины волн, генерируемой параметрическим генератором света, от угла синхронизма  $\theta_c$  (а) и температуры  $T$  (б) при  $\lambda_H = 0,266$  мкм;  $e = \infty$ .

однако в нём можно выполнять более плавную перестройку частоты и он менее требователен к стабильности частоты накачки и механич. вибрациям зеркал и др. элементов.



Рис. 3. Нелинейный кристалл, помещённый в оптический резонатор.  $Z_1$  и  $Z_2$  — зеркала, обеспечивающие обратную связь (отражение) для одной из возбуждаемых волн — одрезонаторный параметрический генератор света, или для обеих волн на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — двухрезонаторный параметрический генератор света.

В существующих П. г. с. диапазон главной перестройки длины волн от 0,4 до 16,4 мкм перекрывается с помощью набора оптич. кристаллов, имеющих разные области оптич. прозрачности, разные нелинейности, разл. пороги разрушения (табл.).

Оптические характеристики некоторых нелинейных кристаллов, используемых в параметрических генераторах света

Материал	Диапазон прозрачности, мкм	Нелинейность $\chi^{(2)}$ , $10^{-12}$ ед. CGSE	Пороговая интенсивность разрушения, МВт/см <sup>2</sup>
ADP	0,2—1,1	0,8	500
KDP	0,22—1,4	0,8	500
LiNbO <sub>3</sub>	0,33—5,0	30	40
Ba <sub>2</sub> NaNb <sub>5</sub> O <sub>15</sub>	0,4—5,0	180	10—60
Ag <sub>3</sub> As <sub>3</sub>	0,04—13	100	20
CdSe	0,75—25	280	40

Источниками накачки служат лазеры непрерывного, импульсного и импульсно-периодич. действия и оптич. гармоника их излучения. Отд. П. г. с. обеспечивают перестройку частоты в пределах 10% от  $\omega_H$ . Особую ценность П. г. с. с плавной перестройкой частоты представляют для ИК-диапазона спектра. Во мн. странах выпускаются промышленные образцы разл. П. г. с. Уникальные характеристики П. г. с. (когерентность излучения, узость спектральных линий, высокая мощность, плавная перестройка частоты) делают его основным, а порой единственным прибором для спектроскопич. исследований (активный спектроскопия и др.), а также позволяют использовать его для селективного

воздействия на вещество (в т. ч. биологическое), для контроля загрязнения атмосферы и в др. целях.

Лит.: Ахманов С. А., Хохлов Р. В., Параметрические усилители и генераторы света, «УФН», 1966, т. 88, с. 439; Яри в А., Квантовый электроника, пер. с англ., 2 изд., М., 1980; Фишер Р., Кудельский Л. А., Оптические параметрические генераторы света, «Квантовый электроника», 1977, т. 4, № 2, с. 245; Параметрические генераторы света и пассивная оптика, Вильнюс, 1983. — А. П. Сухорев.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС** — явление раскачки колебаний при периодич. изменении параметров тех элементов колебат. системы, в к-рых сосредоточается энергия колебаний (реактивные или энергетические параметры). П. р. возможен в колебат. системах разл. физ. природы. Напр., в электрич. *колебательном контуре* реактивными параметрами являются емкость  $C$  и индуктивность  $L$ , в к-рых запасены электрич. энергия  $W_C = q^2/2C$  и магн. энергия  $W_L = LI^2/2$  (где  $q$  — заряд на обкладках конденсатора,  $I$  — ток в катушке индуктивности). Собств. колебания в контуре без потерь с постоянными  $C$  и  $L$  происходит с частотой  $\omega_0 = 1/LC$ . При этом полная энергия  $W = W_C + W_L$ , запасенная в контуре, остается неизменной, происходит лишь ее периодич. трансформация из электрической в магнитную и обратно с частотой  $2\omega_0$ . Изменение параметров  $C$  и  $L$ , сопровождающееся работой внеш. сил (пакачка), приводит к изменению полной энергии системы. Если емкость  $C$  изменить скачком за время, малое по сравнению с периодом собств. колебаний  $T_0 = 2\pi/\omega_0$  (рис. 1, а), то заряд скачком изменится не может (поскольку сила тока  $I$  остается конечной величиной, рис. 1, б). В результате напряжение на емкости  $U = q/C$  (рис. 1, в) и электрич. энергия  $W_C$  изменяются обратно пропорц.  $C$ , причём совершается при этом работа пропорц.  $q^2$ . Если изменить емкость  $C$  периодически (в такт изменениям  $W_C$  (обусловленным собств. колебаниями), уменьшая её в моменты, когда  $q^2$  и  $W_C$  максимальны, и увеличивая, когда эти величины равны нулю (рис. 1), то в ср. за период над системой совершается положит. работа и, следовательно, полная энергия и амплитуда колебаний будут монотонно нарастать.

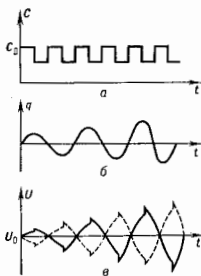


Рис. 1. Связь между изменением емкости  $C$  конденсатора (а), заряда  $q$  на его обкладках (б) и напряжением  $U$  (в) при параметрическом резонансе в колебательном контуре.

П. р. явб. эффективно проявляется при изменении параметров колебат. системы с периодом  $T_H$ , кратным полупериоду собств. колебаний  $T_0$ :

$$T_H \approx nT_0/2, \quad \omega_H = 2\omega_0/n, \quad (1)$$

где  $n$  — целое число,  $\omega_H = 2\pi/T_H$  — частота накачки. Математически свободные колебания в таких системах описываются дифференц. ур-ниями с переменными коэф. Напр., в случае колебат. контура с перем. емкостью  $C(t)$  (в отсутствие омического сопротивления) ур-ние относительно заряда  $q(t)$  имеет вид

$$\ddot{q} + x^2(t)q = 0, \quad x^2 = 1/LC(t) \quad (2)$$

(ур-ние Х и л а). Согласно *Флоке теореме*, общее решение (2) можно записать в виде

$$q(t) = C_1 e^{i\alpha t} \varphi(t) + C_2 e^{-i\alpha t} \psi(-t), \quad (3)$$

где  $C_{1,2}$  — произвольные коэф., определяемые нач. условиями,  $\varphi(t)$  — периодич. ф-ция с периодом  $T_H$ ,  $\alpha$  — коэф., зависящий от параметров системы. При выполнении условия (1)  $\text{Re} \alpha \neq 0$  и один из членов (3) даёт нарастающие во времени колебания. Наиб. быст-

рая раскачка имеет место при  $n = 1$ , когда частота пакачки  $\omega_H$  равна частоте колебаний величин  $W_C$  и  $W_L$  в системе ( $2\omega_0$ ). Нарастание колебаний возможно не только при точном выполнении соотношений (1), но и в нек-рых конечных интервалах значений  $\omega_H$  вблизи  $2\omega_0/n$  (в зонах неустойчивости), ширина зон тем больше, чем сильнее изменяются параметры  $C$  и  $L$ . Изменение параметра, напр. ёмкости  $C$ , характеризуют величиной

$$m = (C_{\text{макс}} - C_{\text{мин}})/(C_{\text{макс}} + C_{\text{мин}}),$$

наз. глубиной изменения параметра. В частном случае sinusoidalного изменения  $x^2(t) = \omega_0^2(1 + m \cos \alpha t)$  [ур-ние (2) при этом наз. ур-нием Матёв] в осн. зоне ( $n = 1$ ) при  $m \ll 1$  инкремент  $\alpha$  равен

$$\frac{\omega_H}{8} \sqrt{m^2 - 4 \left(1 - \frac{2\omega_0}{\omega_H}\right)^2},$$

так что в середине зоны  $\alpha = \omega_0/4$ ; во второй зоне ( $n = 2$ )  $\alpha \sim m^2$ , в третьей  $\alpha \sim m^3$  и т. д.

П. р. приводит к неустойчивости колебат. системы, т. е. к нарастанию малых нач. возмущений, напр. неизбежных во всякой системе флуктуаций, среди к-рых всегда найдётся составляющая с подходящей фазой по отношению к фазе изменения параметров. В отсутствие потерь энергии параметрич. неустойчивость наступает при сколь угодно малой глубине изменения параметров. Если же в системе имеются потери (напр., в контуре присутствует сопротивление  $R$ ), то неустойчивость возникает только при достаточно больших изменениях  $C$  или  $L$ , когда параметрич. накачка энергии иривосходит потерям. Зоны неустойчивости при этом соответственно уменьшаются или даже исчезают совсем (на рис. 2

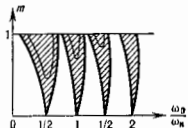


Рис. 2. Области значений  $m$ , в которых возможен параметрический резонанс;  $\omega_0$  — частота собственных колебаний;  $\omega_H$  — частота накачки (изменения параметра).

эти зоны показаны тонкими линиями). Нарастание колебаний при П. р. не происходит беспрерывно, а ограничивается при достаточном больших амплитудах разл. величинными эффектами. Напр., зависимость сопротивления от тока в контуре может приводить к увеличению потерь по мере возрастания амплитуды колебаний, а зависимость ёмкости от напряжения на ней — к изменению периода собств. колебаний  $T_0$  и в результате — к увеличению расстройки между значениями  $\omega_H$  и  $2\omega_0/n$ . Равновесие наступает тогда, когда параметрич. накачка энергии в ср. за период компенсируется потерями (см. *Параметрическая генерация и усиление электромагнитных колебаний*).

Пример механич. системы, в к-рой возможен П. р., — маятник в виде груза массы  $M$ , подвешенного на нити, длину  $l$  к-рой можно изменять (рис. 3). Маятник с неподвижной точкой подвеса совершает собств. колебания с частотой  $\omega_0 = \sqrt{g/l}$ , где  $g$  — ускорение свободного падения, причём сила натяжения нити (равная по величине сумме центробежной силы и составляющей силы тяжести, направленной вдоль нити) максимальна в нижнем положении груза и минимальна в крайних. Поэтому если

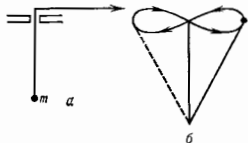


Рис. 3. Устройство маятника с перемещаемой длиной  $l$  подвеса (а) и схема движения тела маятника за один период (б).

уменьшать  $l$  в нижнем и увеличивать в крайних положениях [при этом снова выполняется соотношение (1)], то работа внеш. силы, совершаемая в ср. за период, оказывается положительной и колебания могут раскачиваться. На П. р. основано самораскачивание на качелях, когда эфф. длина маятника периодически изменяется при преследании и вставаниях качающегося. П. р. учитывается в небесной механике при расчёте возмущений планетных орбит, вызванных влиянием др. планет.

В колебат. системах с неск. степенями свободы (напр., в системе из двух связанных контуров, маятника и др.) возможны нормальные колебания (моды) с разл. частотами  $\omega_1, \omega_2$ . Поэтому колебания энергии, запасённой в к.-л. реактивном элементе, содержат не только составляющие с частотами  $2\omega_1, 2\omega_2$ , но и с частотами, равными суммам и разностям разл. нормальных частот. Соответственно нарастание колебаний здесь возможно как при выполнении условия (1) для любой из нормальных частот, так и, напр., при изменении параметра с суммарной частотой:

$$\omega_H = \omega_1 + \omega_2.$$

П. р. приводит к самовозбуждению обоим нормальным колебаниям с определ. соотношением фаз. Резонансная связь мод возможна также при  $\omega_H = \omega_1 - \omega_2$ , однако при этом вместо самовозбуждения происходит лишь периодич. перекачка энергии между модами. Соотношение (2) выражает закон сохранения энергии при распадe кванта «качки» с энергией  $h\omega$  на два кванта:  $h\omega_1$  и  $h\omega_2$ . Отсюда следует также, что мощность  $P_H$ , поступающая в колебат. систему на частоте  $\omega_H$ , и мощности  $P_1, P_2$ , потребляемые на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , пропорц. соответствующим частотам (частный случай т. н. соотношений Мэнли — Роу):

$$P_H/\omega_H = P_1/\omega_1 = P_2/\omega_2.$$

В колебат. системах с распределёнными параметрами, обладающих бесконечным числом степеней свободы, также возможно возбуждение нормальных колебаний в результате П. р. Классич. пример — опыт Мельде (1859), в к-ром наблюдалось возбуждение поперечных колебаний (стоячих волн) в струне, прикреплённой одним концом к ножке камертона, колебания к-рого периодически мелируют натяженную струну (рис. 4) с частотой, вдвое больше частоты собств. поперечных колебаний. П. р. может приводить к раскачке изгибных колебаний вращающихся валов. Др. пример — опыт Фарадея (1831), в к-ром вертикальные колебания сосуда с водой приводят к возбуждению стоячей поверхностной волны с удвоенным периодом.

Существ. особенность П. р. в волновых системах состоит в том, что его эффективность зависит от соотношения между законом изменения параметров системы в пространстве и пространственной структурой волн. Напр., если накачка, изменяющая параметры среды, представляет собой бегущую волну с частотой  $\omega_H$  и волновым вектором  $k_H$ , то возбуждение пары нормальных волн с частотами  $\omega_1, \omega_2$  и волновыми векторами  $k_1, k_2$  осуществляется, если выполняются условия П. р. как во времени, так и в пространстве:

$$\omega_H = \omega_1 + \omega_2; \quad k_H = k_1 + k_2. \quad (4)$$

В предельном случае бесконечно большой фазовой скорости волны накачки  $V = \omega_H/k_H$  ( $k_H \rightarrow 0$  при конечном  $\omega_H$ ) условия (4) дают  $k_2 \rightarrow -k_1$ , и в простейшем случае  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_H/2$ , т. е. нарастать может стоячая волна на половинной частоте. В другом предельном случае ( $\omega_H \rightarrow 0$  при конечном  $k_H$ ,  $V = \omega_H/k_H \rightarrow 0$ ,  $\omega_2 \rightarrow -\omega_1$ ) равенства (4) сводятся к условию резонансного (брагговского) отражения от неподвижной периодич. неоднородности среды; здесь полная энергия сигнала остаётся постоянной, а происходит его отражение (непроникающие) периодич. структурой.

На квантовом языке условия (4) означают, что при распадe кванта накачки сохраняются как энергия, так и импульс ( $h\mathbf{k}$ ). Нарастание амплитуд волн во времени и в пространстве (распадная неустойчивость) также ограничивается нелинейными эффектами: если значит. часть энергии накачки израсходована на возбуждение этих волн, то возможен обратный процесс — рост энергии накачки за счёт ослабления волн на частотах  $\omega_1, \omega_2$ ; в среде без потерь такой обмен энергией происходит периодически.

Возможны также многоволновые процессы, когда во взаимодействии участвует большее число волн.

Параметрич. и нелинейные резонансные взаимодействия волн характерны, напр., для разл. типов волн в плазме, мощных световых волн (см. *Параметрический генератор света*), волн в электронных пучках и др. волновых процессах.

Лит.: М а н д е л ь ш т а м Л. И., Л е н ц и н по теории колебаний, М., 1972; Основы теории колебаний, 2 изд., М., 1988; Р а б и н в и ч И. И., Г р у б е ц к и й В. Д. И., Введение в теорию колебаний и волн, М., 1984.

Л. А. Островский, Н. С. Степанов.

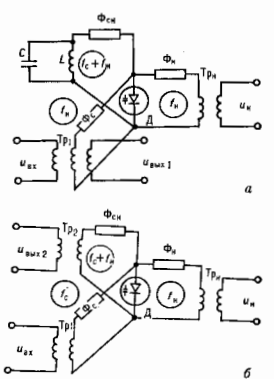
**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ** — радиоэлектронное устройство, в к-ром усиление сигнала по мощности осуществляется за счёт энергии внеш. источника (т. е. генератора накачки), периодически изменяющего ёмкость или индуктивность нелинейного реактивного элемента элктрич. цепи усилителя. П. у. применяют гл. обр. в радиоастрономии, дальней космич. и спутниковой связи и радиолокации как маломощный усилитель слабых сигналов, поступающих на вход радиоприёмного устройства, преим. в СВЧ-диапазоне. Чаще всего в П. у. в качестве реактивного элемента используют параметрич. полупроводниковый диод (ППД). Кроме того, в СВЧ-диапазоне применяют П. у., работающие на электронно-лучевых лампах, в области низких (акусовых) частот — П. у. с ферромагн. (ферритовым) элементом.

Наиб. распространение получили двухчастотные (или двухконтурные) П. у. в сантиметровом диапазоне — регенеративные усилители с сохранением частоты (рис. а), на дециметровых волнах — усилители — преобразователи частоты (рис. б) (см. *Параметрическая генерация и усиление электромагнитных колебаний*). В качестве приёмного колебат. контура и колебат. контура, настраиваемого на всомогательную, или «холостую», частоту (равную чаще всего разности или сумме частот



Рис. 4. Параметрическое возбуждение колебаний струны.

Эквивалентные схемы параметрических усилителей: а — регенеративного; б — с преобразованием частоты «вверх»;  $u_{вх}$  — входной сигнал с несущей частотой  $f_c$ ;  $u_{вых}$  — выходной сигнал с несущей частотой  $f_c$ ;  $u_{вых1}$  — выходной сигнал с несущей частотой  $(f_c + f_0)$ ;  $T_{P1}$  — входной трансформатор;  $T_{P2}$  — выходной трансформатор;  $T_{P3}$  — трансформатор в цепи накачки; Д — параметрический полупроводниковый диод;  $L$  — катушка индуктивности колебательного контура;  $C$  — настроенного на частоту  $(f_c - f_0)$ ;  $\Phi_{вк}$ ,  $\Phi_{вн}$  — элктрические фазы, имеющие малые деловые соотношения соответственно при частотах  $f_c$  ( $f_c \pm f_0$ ),  $f_0$  и достаточно большие при всех других частотах.



сигнала и генератора накачки), в П. у. обычно используют объёмные резонаторы, внутри к-рых располагают ППД. В генераторах накачки применяют *лазерно-проходный диод, Ганна диод*, варакторный умножитель частоты и реже отражат. клиндров. Частота накачки и «холодовая» частота выбираются в большинстве случаев близкими к критич. частоте  $f_{кр}$  ППД (т. е. к частоте, на к-рой П. у. перестаёт усиливать); при этом частота сигнала должна быть значительно меньшей  $f_{кр}$ . Для получения мал. шумовых тем-р (10–20 К и менее) применяют П. у., охлаждаемые до тем-р жидкого азота (77 К), жидкого гелия (4,2 К) или промежуточных (обычно 15–200 К); у неохлаждаемых П. у. шумовая тем-ра 20–500 К и более. Максимально достижимые коэф. усиления и полосы пропускания П. у. определяют в осн. параметрами реактивного элемента. Реализованы П. у. с коэф. усиления мощности призматического сигнала, равными 10–30 дБ, и полосами пропускания, составляющими 10–20% несущей частоты сигнала.

П. у. вытесняются транзисторными малошумящими СВЧ-усилителями, как охлаждаемыми, так и неохлаждаемыми, однако продолжают использоваться в миллиметровом диапазоне радиоволн, где они всё ещё превосходят транзисторные усилители.

Лит.: Эткин В. С., Гершензон Е. М., Параметрические системы СВЧ на полупроводниковых диодах, М., 1964; П. о. у. х и в В. М., Р. о. в. л. д. А. С., Электронно-лучевые параметрические усилители, М., 1968; СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение, пер. с англ., М., 1972; Полупроводниковые параметрические усилители и преобразователи СВЧ, М., 1983.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РАССЕИЕНИЕ СВЕТА** — неупругое рассеяние света в однородной нелинейной среде, параметры к-рой (диалектр. проницаемости) модулируются световой волн. П. р. характеризуется след. особенностями: а) широким непрерывным спек-

света и параметрич. усилителей. Для спонтанного П. р. используются также термопология, принятая для вынужденных параметрических процессов; падающая волна наз. накачкой (частоты  $\omega_0$ ), а рассеянные волны наз. сигнальной (частоты  $\omega$ , её обычно наблюдают в эксперименте) и холодной (частоты  $\omega'$ , обычно ненаблюдаемая).

Для эффективного П. р. необходимо выполнение условия **фазового синхронизма**:

$$k_{\omega} = k + k', \quad (2)$$

здесь  $k_{\omega}$ ,  $k$ ,  $k'$  — полные векторы накачки, сигнала и холодной волны в веществе (рис. 2). Так как  $k =$

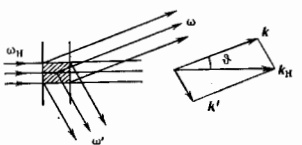


Рис. 2. Параметрическое рассеяние при распространении света в диелектрикx кристаллах: фотоны распадаются на пары фотонов с меньшими энергиями и частотой, зависящей от направления распространения.

$= \omega/c$ , то определ. соотношения устанавливаются и между показателями преломления среды (чаще кристалла) для частот  $\omega_0$ ,  $\omega$  и  $\omega'$ . Для выполнения условия фазового синхронизма используют зависимость показателя преломления не только от углов распространения, но и от типа поляризации; напр., если волна накачки всеобщеполосная, а рассеянные волны обыкновенные, то при фиксиров. угле  $\phi$  между направлением луча накачки и оптич. осью кристалла частота  $\omega$  зависит только от угла рассеяния  $\phi$  (рис. 3).

П. р. можно описать феноменологически с помощью макроско-



Рис. 3. Связь между частотой рассеянного излучения и направлением его распространения и  $\phi$  при различных ориентациях кристалла. Штриховые линии относятся к рассеянию на оптических фононах и поляризации; кружком отмечен коллинеарный синхронизм при генерации второй гармоники.

пич. ур-ний Максвелла и понятия *нелинейной восприимчивости* среды. Если в среде с квадратичной восприимчивостью  $\chi^{(2)}$  распространяются две волны с частотами  $\omega_0$  и  $\omega'$ , то возникает третья — сигнальная волна с разностной частотой  $\omega = \omega_0 - \omega'$ . Её интенсивность в фотонах на моду, т. е. спектральная яркость в единицах  $h\omega^3/8\pi^3c^3 \approx B_{\omega\omega\omega}^{(0)}$ , имеет вид:

$$N_k = F_k(N_k + 1). \quad (3)$$

Здесь  $F_k$  — коэф. параметрич. преобразования холодных волн в сигнальные, принимающий макс. значение на поверхности синхронизма. Единица, добавленная к интенсивности  $N_k'$  холодной волны, описывает эффект П. р., интенсивность к-рого в фотонах на моду численно равна, т. о., коэффициенту параметрич. преобразования.

П. р. можно также трактовать как рассеяние падающего света накачки на квантовых флуктуациях холодного поля среды, напр. на поляритонах. Колебания ионов в решётке кристалла сопровождаются колебаниями эл.-магн. поля внутри кристалла; поляритон — это квант макроскопич. (усреднённого) поля, т. е. фотон в среде, поэтому о П. р. иногда говорят как о «рассеянии света на свете» по аналогии с рассеянием света на свете (Майделштана — Бриллюэна рассеяние). Однако обычно термин «рассеяние света на свете» отно-

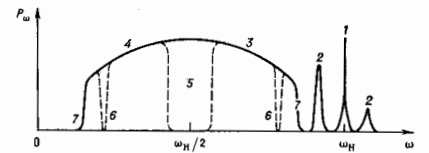


Рис. 1. Примерный вид спектра рассеяемого пьезокристаллом излучения: 1 — рассеяное рассеяние; 2 — комбинационное рассеяние на поляритонах и оптических фононах; 3 — сигнальное параметрическое рассеяние; 4 — холодное параметрическое рассеяние; 5 — провал в области  $\omega_n/2$  из-за отсутствия синхронизма; 6 — эффект «линеаризации» кристалла из-за прохождения квадратичной нелинейности через нуль при смене знака; 7 — отсутствие синхронизма при уменьшении показателя преломления для холодной волны.

ром рассеянного излучения, не зависящим от собств. частот атомов и молекул (рис. 1); б) зависимостью частоты рассеянного света от угла рассеяния (направления наблюдения); в) рассеянный свет состоит из коррелированных паров фотонов («бифотонов») и является «сжатым», т. е. имеет неодинаковые дисперсии квадратурных амплитуд (см. *Сжатое состояние света*). П. р. наз. также параметрич. люминесценцией, параметрич. преобразованием частоты света и т. п.

П. р. объясняется спонтанным распадом фотонов падающего света на пары фотонов с меньшими энергиями в результате взаимодействия эл.-магн. поля с веществом. Состояние вещества при этом не изменяется (в отличие от большинства др. видов неупругого рассеяния), поэтому выполняется закон сохранения энергии для фотонов:

$$h\omega_0 = h\omega + h\omega', \quad (4)$$

где  $\omega_0$  — частота падающего света,  $\omega$  и  $\omega'$  — частоты рассеянного света. Вынужденный процесс типа (4) лежит в основе действия *параметрических генераторов*

сят к процессу след. порядка малости, с участием двух фотонов накачки ( $2\omega_n = \omega + \omega'$ ). Этот процесс, наз. гиперпараметрич. рассеянием, возможен и в центросимметричной среде (за счёт её кубич. восприимчивости), и даже в вакууме (за счёт рождения виртуальных электро-ионозных пар). Т. о., возможно, по крайней мере, три точки зрения на причину П. р.: распад фотонов накачки при когерентном взаимодействии со средой; квадрупольные шумы параметрич. усиления; рассеяние света в среде с квадратичной нелинейностью.

При в слишком большой плотности мощности накачки ( $I_n \ll 100 \text{ МВт/см}^2$ )  $F_k$  линейно зависит от  $I_n$  (спонтанное П. р.):

$$F_k = G^2 I^2 = (2\pi)^2 \chi^{(2)2} I_n^2 / c^2 \lambda \lambda',$$

здесь  $G$  — коэф. усиления. При  $I_n = 1 \text{ Вт/см}^2$ ,  $\lambda = \lambda' = 0.5 \text{ мкм}$ ,  $\chi^{(2)} = 10^{-8} \text{ см}^2/\text{В}$   $\text{эрг}^{-1/2}$ , проницаемости образца  $\lambda = 1 \text{ см}$  и точном синхронизме коэф. параметрич. преобразования  $F_k$  имеет порядок  $10^{-7}$ , что соответствует яркостной темп-ре излучения П. р.  $T_k \approx 4800 \text{ К}$ . Такое излучение легко наблюдается невооружённым глазом; имеет вид цветных колец при наблюдении с торца образца. Спектральная мощность П. р.  $P_s$  — порядка  $10^{-8} \text{ Вт/м}$  при мощности накачки  $P_n = 1 \text{ Вт}$ . Это излучение распределено по образующим конуса с разостром  $\approx 10^\circ$  (рис. 3). «Толщина» конич. поверхности имеет дифракц. предел  $\Delta\theta = \lambda_n / \theta \approx 1'$ . Общая эффективность спонтанного П. р. составляет примерно  $f_{P_s} \Delta\lambda / h \omega_n \approx 10^{11}$  пар фотонов в секунду. Эта оценка показывает, что П. р. является эфф. источником «двухфотонного» света, т. е. излучение с нарвой корреляцией фотонов. Формально это свойство поля спонтанного П. р. выражается в необычной статистике фотонов, а именно: корреляция чисел фотонов в модах, связанных условием синхронизма, совпадает со ср. числами фотонов в каждой моде (т. е. в объёме когерентности):  $nn' - \bar{n}\bar{n}' = n - \bar{n} \ll 1$ ; при этом отност. корреляция  $nn' / \bar{n}\bar{n}'$  много больше единицы (т. н. эффект группировки фотонов или «сверхпуассоновской статистики»). Двухфотонный характер поля П. р. может быть использован в фотометрии для абсолютного (безэталонного) измерения эффективности фотодетекторов. Действительно, если яркость известно, что фотоны попадают на счётчик фотонов (ФЗУ) только парами, но два, то вероятность появления на выходе счётчика двойного импульса  $p_2 = \eta^2$ , где  $\eta$  — *квантовый выход* счётчика, а вероятность одиночного импульса  $p_1$  равна, очевидно,  $2\eta(1 - \eta)$ . Отсюда  $\eta$  определяется отност. числом двойных импульсов ( $p_2/p_1$ ):  $\eta = (1 + p_1/2p_2)^{-1}$ .

Возможно также др. фотометрия. применение П. р., основанное на соотношении (3), согласно к-рому отношение сигнал/шум на выходе параметрич. преобразователя частоты равно спектральной яркости холостого излучения в единицах  $W_0/\Omega$ . Поскольку оба описанных метода являются абсолютными и основаны на простых закономерностях, они могут представлять интерес для метрологии и прирешки к созданию «квантовой» фотометрии.

Эффект П. р. применяется также в новом методе спектроскопии кристаллов, позволяющем сравнительно просто измерять в широком спектральном диапазоне линейные и нелинейные параметры пьезокристаллов, их стехиометрич. состав, обнаруживать слабые колебания решётки, доменную структуру, фазовые переходы. Обычно удобно использовать метод «скрещенной дисперсии», при к-ром регистрируется непосредственно частотно-угл. спектр П. р. и поляризованного рассеяния  $I(\theta)$ . В этом методе свет от источника накачки 1 (рис. 4) проходит через рассеивающий исследуемый кристалл 2 и попадает в объектив 3, в фокусе к-рого расположена вертикальная щель 4 спектрометра 5. Вдоль щели образуется угл. спектр  $I(\theta)$ , к-рый при

развёртке спектрографом в горизонтальной плоскости по частоте преобразуется в частотно-угл. спектр  $I(\omega, \theta)$  (рис. 4, справа).

При большой интенсивности накачки, когда  $G \gg 1$ , коэф. параметрического преобразования и соответствующая спектральная яркость мазлоугольного П. р. зависят от заданной накачки от  $G$  экспоненциально:  $F_k \approx \exp(2G^2)/4$ . Это явление, наблюдаемое при облучении пьезокристаллов мощными импульсными лазерами, наз. выужденным П. р. или параметрич. сверх-

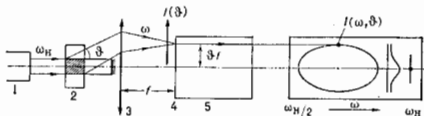


Рис. 4. Схема частотно-углового спектрометра. Справа — двумерное распределение излучения в выходной плоскости спектрометра.

люминисцирующей (см. *Выужденное рассеяние света*). Оно используется для генерации мощных пикосекундных импульсов света, частоту к-рых можно плавно перестраивать, изменяя ориентацию или темп-ру кристалла (см. *Комбинационный лазер*).

П. р. может представлять интерес для методологии квантовой механики, т. к. позволяет легко реализовать эксперимент с двумя коррелированными квантовыми объектами, фигурирующий в известном парадоксе Эйнштейна (см. *Эйнштейна — Подольского — Розена парадокс*): корреляция двух счётчиков фотонов невозможно описать с помощью классич. представлений.

Лит.: Кляшник Д. Н., *Фотоны и нелинейная оптика*, М., 1980; Кляшник Д. Н., Пенин А. К., *Перспективы квантовой фотометрии*, «ФНТ» 1981, т. 152, с. 653; Нолл С. К., Мандель Л., *Theory of parametric frequency down conversion of light*, «Phys. Rev.», 1985, v. A31, p. 2409; *Состояние электромагнитного поля*, «J. Opt. Soc. Amer.», 1987, v. 4, № 10, с. 1407; Д. Н. Кляшник.

**ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ** (термодинамические параметры) — физ. величины, характеризующие равновесное состояние термодинамич. системы: темп-ра, объём, плотность, давление, намагниченность, электрич. поляризация и др. Различают *внутренние* и *внешние* П. с., пропорциональные объёму (или массе) системы (*внутренняя энергия U*, *энтропия S*, *энтропия II*, *Гельмгольца энергия*, или свободная энергия  $F$ , *Гиббса энергия G*), и *интенсивные* П. с., не зависящие от массы системы (темп-ра  $T$ , давление  $P$ , коэф.цирляция  $\alpha$ , хим. потенциал  $\mu$ ). В состоянии термодинамич. равновесия П. с. не зависят от времени и пространства. координат. В неравновесном (квазиравновесном) состоянии П. с. могут зависеть от координат и времени.

Термодинамич. состояние определяется заданием совокупности независимых П. с. Однако не все П. с. являются независимыми. *Уравнение состояния* выражает зависимость П. с. через независимые; напр., давление является ф-цией темп-ры и объёма  $P = P(T, V)$ . Объём является ф-цией темп-ры и П. с., т. к. определяются положением влещ. тел (стены сосуда, положение поршня). Темп-ра зависит только от внутр. состояния системы и наз. *внутренним* П. с. В общем случае  $P = P(a_1, \dots, a_n, T)$ , где  $a_i$  — внеш. П. с.

Элементарная работа  $\delta A$  термодинамич. системы определяется П. с., напр. для жидкости или газа  $\delta A = P \delta V$ , а в общем случае  $\delta A = \sum X_i \delta a_i$ , где

$X_i = X_i(a_1, \dots, a_n, T)$  — обобщённые силы, являющиеся также П. с. Каждому набору независимых П. с. соответствуют определ. *потенциалы термодинамические (характеристические функции)*, определяющие все термодинамич. свойства системы и зависящие лишь от выбранных параметров; напр., внутр. энергия  $U = U(V, S)$ , энтропия  $S = S(V, U)$ , энтропия  $H = H(P, S)$ , энергия Гельмгольца (свободная эпер-

гия  $F = F(V, T)$ , энергия Гиббса  $G = G(P, T, N)$ ,  $N$  — число частиц. Для многокомпонентных систем нужно учитывать ещё долины. П. с. с. концентрации компонент  $c_i$  или их хим. потенциалы  $\mu_i$ . Для многофазных систем каждая фаза описывается своим парциальным термодинамич. потенциалом (см. *Гиббс правдо фаз*).

**ПАРАПРОЦЕСС** (истинное намагничивание) — возрастание во внеш. магн. поле  $H$  абс. величины намагниченности  $M$  на завершающем этапе *намагничивания* ферро- и ферримагнетиков (после процессов «смещения» и «вращения»). П. обусловлен ориентацией в поле  $H$  элементарных носителей магнетизма (спиновых и орбитальных магн. моментов атомов или ионов), оставшихся неупорядоченными вследствие дезорганизующего действия теплового движения. На этапе П. намагниченность  $M$  под действием внеш. поля стремится приблизиться к величине абс. насыщения  $M_0$ , т. е. к намагниченности, к-рую имел бы ферри- или ферромагнетик при  $T = 0\text{ К}$ . П. в большинстве случаев даёт малый прирост намагниченности, поэтому практически процесс намагничивания считают законченным при достижении тех. насыщения. Вблизи точки Кюри, где роль процессов «смещения» и «вращения» уменьшается, а П., наоборот, увеличивается (вследствие увеличения числа магн. моментов атомов, рауупорядоченных возрастающим тепловым движением), оно почти полностью определяет характер намагничивания ферро- и ферримагнетиков.

Отличие П. от обычного парамаг. намагничивания, наблюдаемого, напр., в ферромагнетиках выше точки Кюри, состоит в том, что магн. восприимчивость П.  $\chi_d$  с повышением темп-ры  $T$  не падает, а возрастает (особенно интенсивно при приближении к *Кюри точке*). «Ферромагнитный» характер П. обусловлен тем, что в ферро- и ферримагнетиках на магн. моменты носителей магнетизма действуют мощные обменные силы (см. *Обменные взаимодействия в магнетизме*), тогда как в обычных парамагнетиках взаимодействие между магн. моментами мало. В случае изотропных обменных сил, напр. в кубич. ферро- и ферримагн. кристаллах,  $\chi_d$  не зависит от направления относительно кристаллограф. осей. В др. случаях, напр. у гексагональных кристаллов редкоземельных ферромагнетиков, наблюдается анизотропия  $\chi_d$ , т. к. здесь имеет место анизотропия общего взаимодействия. Изменения свойств ферро- и ферримагнетиков (магнитострикция, гальваномагнитный, магнитокалорич. и др. эффекты) при П. характеризуются рядом особенностей (см. *Магнитострикция, Магнитокалорический эффект*). В редкоземельных ферритах-гранатах сильный П. возникает не только вблизи точки Кюри, но и в области низких темп-р за счёт упорядочения внеш. магн. поля магн. моментов редкоземельных ионов, находящихся в слабом обменном поле. В ряде ферритов-шпинелей в области низких темп-р внеш. магн. поле может разрушить неколлинеарное расположение магн. моментов подрешеток, что также даёт возрастание  $\chi_d$ . Сильный П. при низких темп-рах возникает в зонах ферромагнетиков ( $\text{GdCo}_2$  и др.) за счёт расщепления полем  $H$  зоны 3d-электронов на подзоны со спином «вверх» и «вниз».

Лит.: Акулов Н. С., Ферромагнетизм, М.—Л., 1939; Белов К. П., Магнитные превращения, М., 1959; его же с Ферритами в сильных магнитных полях, М., 1972; Вонсовский С. В., Магнетизм, М., 1971; Белов К. П., Магнитотепловые явления в редкоземельных магнетиках, М., 1990.

**ПАРАСТАТИСТИКА** — статистика тождественных частиц, когда их число в симметричном (параферми-статистика) или антисимметричном (парабозе-статистика) состоянии не превосходит нек-рое заданное целое число  $p > 1$ , называемое порядком парастатистики. П. является обобщением ферми- и бозе-статистик (см. *Ферми—Дирака статистика*, *Бозе—Эйнштейна статистика*), к-рые также можно определять как статистики, когда число частиц в симметричном состоянии для ферми-статистики и в антисимметричном состоянии для бозе-статистики не

может превосходить число  $p = 1$ ; отсюда следует, что волновые ф-ции в тождеств. частиц для ферми-статистики могут быть только антисимметричными, а для бозе-статистики — только симметричными, что совпадает с обычным определением этих статистик. Для П. каждому состоянию системы в тождеств. частиц отвечает не одна, а *песк.* волновых ф-ций, образующих векторы одного из *многомерных* неприводимых представлений группы перестановок  $S_n$ . Среднее от к.-л. наблюдаемой определяется как след по данному представлению. При этом перестановки аргументов тождеств. частиц не приводят к наблюдаемым эффектам. Однако определённые линейные комбинации операторов перестановок — *характеры* — являются наблюдаемыми и неприводимыми представлениями  $S_n$  классифицируются по их особ. значениям.

Для систем тождеств. частиц должен выполняться т. и. кластерный закон: при удалении одной или *песк.* частиц на достаточно большое расстояние подсистема из оставшихся частиц должна описываться волновой ф-цией, допустимой данной статистикой частиц. Пределу  $p \rightarrow \infty$  соответствует бесконечные статистики, к-рые описываются произвольными неограниченными *Юнга* *схемами*. Конечным статистикам ( $p$  ограничено) отвечают *схемы Юнга* либо с ограниченным числом столбцов (фермиподобные статистики), либо с ограниченным числом строк (бозеподобные статистики). Существует недоказанное предположение, что бесконечным статистикам отвечает классич. статистика Максвелла — Больцмана. Конечные параферми-статистики ( $1 < p < \infty$ ) занимают промежуточное положение между ферми- и бозе-статистиками, и по этой причине их наз. также *промежуточными* статистиками Джентиле [по имени Д. Джентиле (D. Gentile), впервые предложившего их в 1940]. Соответствующему гипотетич. парагазу свойственно наличие как *ферми-энергии*, так и *Бозе — Эйнштейна конденсации*.

При вторичном квантовании парастатистикам соответствуют квантовые параполя, удовлетворяющие в общем случае т. н. *паракоммутации* соотношениям Грина у [Х. С. Грин (H. S. Green), 1953]. Эти соотношения имеют трilinearную форму. Напр., для спинорного Дирака поля  $\psi(x)$ , квантовому по Грину:

$$\begin{aligned} [[\psi^*(x), \psi(y)], \psi(z)] &= -2\delta(x-z)\psi(y), \\ [[\psi(x), \psi(y)], \psi(z)] &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

и т. д., при одинаковых временах  $x_0 = y_0 = z_0$ , где  $\delta(x)$  — Дирака функция, квадратные скобки означают коммутатор, а крест — эрмитово сопряжение [ $x = (x_0, \mathbf{x})$ ,  $y = (y_0, \mathbf{y})$ ,  $z = (z_0, \mathbf{z})$  — точки пространственно-временные; используются система единиц, в к-рой  $\hbar = c = 1$ ]. Можно показать, что для этих соотношений при фиксированном  $p$  существует представление, характеризуемое единств. вакуумным состоянием, хотя (при  $p > 1$ ) имеется и бесконечное множество др. неприводимых представлений, основанных на выродженных векторах состояния с отличным от нуля числ. числом частиц.

С граничными соотношениями (1) связаны *Ли алгебры* ортогональной (в случае параферми-статистики) и симплектической (в случае парабозе-статистики) групп в бесконечномерных пространствах [С. Камерфут (S. Kamefuchi), Акахаши (Y. Akahashi), 1962]. Обычным статистикам соответствуют спинорные представления этих групп, тогда как П. — представления с  $p$  спинорными индексами. На этой основе параполе любого порядка можно представить в виде суммы обычных фермионных или бозонных полей, удовлетворяющих, однако, аномальным взаимным коммутац. соотношениям (т. и. *анзац Грина*):

$$\psi(x) = \sum_{\alpha=1}^p \psi^{\alpha}(x),$$

$$\begin{aligned} [\Psi^A(x), \Psi^{B+}(y)]_{\epsilon_{AB}} &= \delta_{AB} \delta(x-y), \\ [\Psi^A(x), \Psi^B(y)]_{\epsilon_{AB}} &= [\Psi^{A+}(x), \Psi^{B+}(y)]_{\epsilon_{AB}} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

при равных временах  $x_0 = y_0$ . Индекс  $\epsilon_{AB} = (1 - \delta_{AB})\epsilon$  означает коммутатор, если он равен  $-1$ , и антикоммутатор, если он равен  $+1$ ;  $\epsilon = -1$  или  $+1$  соответственно для параферми- и парабозе-статистик;  $\delta_{AB} =$  символ Кронекера. На основе такого представления параллель доказана теорема о том, что любая теория парабозел эквивалентна теории  $p$ -кратно вырожденных свободных обычных полей, обладающих в общем случае глобальной внутренней симметрией  $SO(p)$ , а при ограниченном выборе допустимых наблюдаемых —  $SU(p)$ . На этой основе для конечных  $P$  доказана также обобщённая Паули теорема о связи спина со статистикой: частицы с полуцелым спином подчиняются парафермистатистике, а частицы с целым спином — парабозе-статистике. Т. о., теория  $P$  и параллель приводится к случаю обычных статистик и обычных полей, вырожденных по векторной внутр. степени свободы. Обратное утверждение в общем случае несправедливо: не всякая внутр. симметрия может быть перемурована на языке параллелей. В особенности это относится к калибровочным симметриям (симметриям относительно калибровочных преобразований).

Теория параллелей получила особое развитие в связи с созданием кварковой модели строения адронов. Для решения проблемы помещения трёх кварков в одно и то же квантовомеханич. состояние О. У. Гринберг (О. W. Greenberg, 1964) выдвинул гипотезу о подчинении кварков параферми-статистике 3-го порядка. Однако оказалось, что последоват. переход к калибровочной симметрии в рамках параллелей приводит к теории, эквивалентной калибровочной симметрии  $SO(3)$ , к-рая отличается от квантовой хромодинамики наличием только трёх цветовых и возможностью существования бесцветных дикварковых состояний, экспериментально не обнаруженных. По этой причине гипотеза паракварков либо должна быть полностью заменена гипотезой о физ. цветовой кварковой симметрии  $SU(3)$  (см. Цвет), либо для включения последней в рамках параллелей их теория должна быть существенно расширена. Такое расширение достигается включением в анзац Грина произведение обычных фермионных (или бозонных) полей на элементы комплексной Клиффорда алгебры:

$$\psi(x) = \sum_{A=1}^P \psi^A(x) e_A,$$

$$e_A e_B^+ + e_B^+ e_A = \delta_{AB}, e_A e_A + e_A e_A^+ = e_A^+ e_A + e_A^+ e_A^+ = 0.$$

В силу последнего свойства (гильбертовости) в такой теории нельзя непосредственно рассматривать системы с более чем  $p$  частиц, но можно рассматривать нек. систем с числом частиц, не большим  $p$  в каждой из них. Иное обобщение параллелей основывается на аналогичной конструкции, где в качестве  $e_A$  берутся элементы неассоциативной алгебры октонионов. В этом случае однозначно фиксируется порядок  $P$  («цвет»)  $p = 3$ , однако возникает проблема построения гильбертова пространства векторов состояний.

Лит.: Д и р а н П., Принципы квантовой механики, пер. с англ., 2 изд., М., 1979, с. 280—96; Г о в о р и о в А. Б., Парастатистика и внутренние симметрии, «СЧАЯ», 1983, т. 14, в. 5, с. 1229.

**ПАРАЭЛЕКТРИКИ** — диэлектрики, для к-рых величина зависимости поляризации  $P$  от электрич. поля  $E$  проявляется уже в слабых полях и является безгистерезисной. К П. относятся, в частности, сегнетоэлектрики в неполярной фазе вблизи темп-ры Кюри. Электрич. уравнение состояния здесь можно представить в виде

$$E = AP + BP^3,$$

причём величина  $A$  аномально мала (обращается в

нуль в точке сегнетоэлектрич. перехода 2-го рода). Др. причиной сильной нелинейности  $P$  может быть структурный фазовый переход, возникающий в кристалле при наложении уже относительно небольшого электрич. поля (см. Антиферроэлектрики).

**ПАРАЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС** — резонансное поглощение радиоволн, связанное с переориентацией электрич. дипольных моментов (ЭДМ) частиц вещества во внеш. электрич. полях; электрич. аналог магнитного резонанса. Первые наблюдения относятся к 1866.

В кристалле могут существовать дефекты, обладающие ЭДМ. Это прежде всего примесные молекулы, к-рые обладают ЭДМ даже в свободном состоянии (напр.,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CN}^-$ ). В кристалле они могут ориентироваться лишь в определённых (энергетически эквивалентных) направлениях в соответствии с симметрией окружения. К др. типу дефектов относятся т. н. центральные ионы, замещённые в кристалле более тяжёлыми ионами (напр.,  $\text{Li}^+$  в  $\text{KCl}$ ). Равновесные положения примесных ионов смещены относительно узлов, с чем и связано появление ЭДМ. В соответствии с симметрией кристалла может быть нек. (4, 6, 8, 12) энергетически эквивалентных равновесных положений.

Наличие у дефектов эквивалентных положений приводит к вырождению состояний, между этими состояниями происходят туннельные переходы. В результате возникает расщепление уровней. Внеш. пост. электрич. поле смещает (дополнительно расщепляет) эти уровни, появляется возможность ими управлять. Если к кристаллу дополнительно приложить ещё и перем. электрич. поле, возникают квантовые переходы с поглощением или излучением эл.-магн. волн. Переходы осуществляются резонансно, на опред. частоте, соответствующей разности энергий между двумя уровнями. Это явление и принято называть П. р. Характерная область частот П. р. — диапазон СВЧ ( $10^{10}$ — $10^{11}$  Гц).

Наряду с описанными выше П. р. существуют родственные этому явлению эффекты, восящие иногда то же название. Так, мн. парамагн. центры, расположенные в местах кристаллич. решётки, не являющиеся центрами инверсии (напр., Fe в узле или междуузлии Si), обладают отличным от нуля ЭДМ. Энергетич. структура таких дефектов чувствительна не только к внеш. магн. полям, но и к внеш. электрич. полям. Поэтому условия резонанса в них можно осуществлять изменяя внеш. статич. электрич. поля, а переходы между уровнями — перем. электрич. полем. Это позволяет комбинировать магн. поля с электрическими.

Открытие П. р. и связанных с ним явлений привело к созданию нового направления в физике твёрдого тела — электрической радиоспектроскопии и т. д. Её задачи совпадают с задачами магн. радиоспектроскопии: изучение диполь-решёточного и диполь-дипольного взаимодействий, ширины резонансных линий, роли веш. воздействий, природы дефектов и их окружения и т. д. Это направление находит и практич. применение: созданы генераторы гипервакуа, низкотемпературные термометры, разработан метод параэлектрич. адиабатич. охлаждения.

Лит.: Электрические эффекты в радиоспектроскопии, М., 1981; Н о в и л а е в У. Х., С а б у р о в а Р. В. Параэлектрический резонанс, М., 1982.

**ПАРНАЯ КОНВЕРСИЯ** — см. в ст. Конверсия энтропии.

**ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ** в атмосферах планет — повышение темп-ры внутр. слоёв атмосферы и поверхности планеты, обусловленное тем, что атмосфера более прозрачна для падающего солнечного излучения, чем для уходящего теплового излучения поверхности (и своего собственного). Энергия, получаемая планетой от Солнца за единицу времени, равна энергии, излучаемой в космич. пространство (если пренебречь тепловым потоком из недра планеты). Последний характеризуется ср. эффективной температурой

планеты,  $T_e$ . Т. о., у-рие энергетич. баланса планеты может быть представлено в виде

$$4\pi r^2 \sigma T_e^4 = \pi r^2 \frac{E_0}{R(1-A)}, \quad (1)$$

где  $r$  — радиус планеты,  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $E_0$  — солнечная постоянная,  $R$  — расстояние от Солнца, выраженное в а. е.,  $A$  — сферич. альbedo планеты. Слева в (1) — энергия, излучаемая планетой в космич. пространство, справа — энергия, получаемая от Солнца. При наличии атмосферы ср. темп-ра поверхности  $T_s$  не равна  $T_e$ . Как правило,  $T_s > T_e$ , и это объясняется П. з. Разность  $\Delta T = T_s - T_e$  является мерой П. з.

Солнечное излучение сконцентрировано в более КВ-части спектра, чем тепловое излучение планеты: 75% энергии солнечного излучения приходится на диапазон длин волн от 0,4 до 1,5 мкм, а 75% энергии теплового излучения при  $T = 300^\circ \text{K}$  (что прибр. соответствует земным условиям) на диапазон 8–28 мкм, т. е. переизлучение поглощённой солнечной энергии происходит в ИК-диапазоне.

Получившееся описание П. з. можно провести при помощи след. простой модели оптич. свойств планетной атмосферы: 1) оптич. толщина  $\tau_1$  для солнечного излучения (коротковолнового) не зависит от длины волны; 2) оптич. толщина  $\tau_2$  для планетного излучения (длинноволнового) тоже не зависит от длины волны, причём  $\tau_1 \neq \tau_2$ ; 3) передача солнечной энергии вниз осуществляется лучистым переносом (переносом излучения) с участием только процессов чистого (консервативного) рассеяния; 4) передача энергии вверх осуществляется лучистым переносом, но с участием только процессов истинного поглощения. Приближённое решение у-рия переноса для такой модели даёт

$$T_s/T_e \approx \sqrt{1+a+b\tau_2},$$

где  $a$  и  $b$  — константы порядка 1. Величина  $\tau_1$  на это отношение не влияет, однако от него зависит абс. значения обеих темп-р, т. к.  $T_e$  зависит от альbedo [см. у-рие (1)], а оно, в свою очередь, зависит от  $\tau_1$  (при  $\tau_1 \rightarrow \infty$ ,  $A \rightarrow 1$ ). В реальных атмосферах всё обстоит взаимно сложнее, но гл. факторы, определяющие природу П. з., отражены данной моделью правильно. В самом деле сильные полосы поглощения атм. газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и др.) находятся в ИК-диапазоне, здесь доминируют процессы истинного поглощения, а в КВ-диапазоне преобладает рассеяние (газовое и аэрозольное) (см. *Атмосферная оптика*).

Среди трёх планет земной группы, имеющих достаточно плотную атмосферу, П. з. наиб. сильно выражен на Венере ( $T_s \approx 735 \text{ K}$ ,  $T_e \approx 230 \text{ K}$ ), наиб. слабо — на Марсе ( $\Delta T \approx 5 \text{ K}$ ). Это объясняется разл. кол-вом атм. газа (полное давление 90 бар и 6 мбар соответственно). В обоих случаях  $\text{CO}_2$  является основной составляющей и наиб. эфф. поглотителем. Содержание  $\text{H}_2\text{O}$  в атмосфере Венеры всего  $\sim 10^{-4}$  по объёму, однако водяной пар вносит значит. вклад в П. з. на этой планете, т. к. его коэф. поглощения в ИК-диапазоне очень велик. Промежуточное положение по величине П. з. занимает Земля ( $T_s = 288 \text{ K}$ ,  $T_e = 249 \text{ K}$ ). Важнейшие поглощающие газы здесь также  $\text{CO}_2$  ( $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ ) и  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\sim 10^{-2}$ ). П. з. повышает темп-ру поверхности Земли примерно на 40 К и играет первостепенную роль в формировании её климата.

Содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли постепенно возрастает вследствие развития индустриальной активности человечества. В атмосферу выбрасываются также др. газы, поглощающие в ИК-диапазоне, и если этот процесс будет продолжаться, то не исключено, что он может привести к изменению климата катастрофич. характера. Необходимы детальные точные и длит. измерения изменений содержания малых составляющих земной атмосферы, и, возможно, в недалёком будущем

придётся принимать глобальные меры для её охраны как важнейшего элемента окружающей среды.

В случае Юпитера и Сатурна влияние П. з. на теплов. режим атмосферы также возможно, но там оно менее существенно, т. к. у этих планет имеется большой поток тепла из недра (сравнимый с солнечным). Вероятно, П. з. играет нек-рую роль в атмосфере Титана.

Влияние П. з. на климатич. характеристики Земли и др. планет могло изменяться в ходе их прошлой эволюции. Не исключено, напр., что резкое отличие атмосферы Венеры от земной объясняется тем, что на этой планете на ранних этапах её эволюции возникли условия для «необратимо равновзвешенного» П. з., когда рост темп-ры приводил к поступлению в атмосферу всё большего кол-ва поглотителей газов, а это, в свою очередь, вело к росту темп-ры и т. д.

Лит.: К о л л а р а т ь е в К. Я., Лучистый теплообмен в атмосфере, Л., 1956; М о р о з В. М. и У х о в Л. М., О ранних этапах эволюции атмосферы и климата планет земной группы, «Космич. исслед.», 1977, т. 15, с. 901; М о г о л В. И., The atmosphere of Venus, «Sp. Science Rev.», 1981, т. 29, р. 3; Б о р о в с к и е в В. П., Климат и деятельность человека, М., 1982.

**ПАРООБРАЗОВАНИЕ** — переход вещества из конденсиров. фазы (жидкой или твёрдой) в газовую. П. сопровождается поглощением теплоты и увеличением объёма (фазовый переход 1-го рода). П. со свободной поверхностью жидкости — *испарение*, с поверхности твёрдого тела — *сублимация*. П. в объёме (*кипение*) обусловлено возникновением и ростом пузырьков насыщенного пара на стенках сосуда и в жидкости. Испарение (сублимация) не прекращается при низкой темп-ре, когда кипение невозможно. Для перехода молекул в пар они должны приобрести при тепловом движении кинетич. энергию, достаточную для преодоления сил притяжения со стороны своих соседей в конденсиров. фазе. Чем ниже темп-ра  $T$ , тем меньшая доля молекул обладает необходимым запасом энергии и тем меньше поток испаряющихся молекул. Равенство прямого и обратного потоков определяет давление насыщенного пара  $P(T)$  при данной темп-ре. Величина  $dP/dT > 0$  связана *Клапейрона — Клаузиуса уравнением* с тепловой испарения  $L$  и с изменением уд. объёма  $\Delta v$ :  $dP/dT = L/T\Delta v = \Delta S/\Delta v$ . Здесь  $\Delta S = L/T$  — изменение энтропии при равновесном изобарно-изотермич. испарении. Т. к.  $L = \Delta H = \Delta U + P\Delta v$ , где  $\Delta H$ ,  $\Delta U$  — изменения уд. энтальпии и внутр. энергии при П., то в теплоте испарения можно выделить слагаемое  $P\Delta v$ , равное работе расширения вещества при П. С ростом темп-ры (давления)  $\Delta S$ ,  $L$ ,  $\Delta v$  уменьшаются и обращаются в нуль в *критической точке* ( $P_K$ ,  $T_K$ ,  $U_K$ ) равновесная жидкость — пар. В табл. приведены значения характерных величин для воды ( $P_K = 22,11$  МПа,

Термодинамические параметры равновесного перехода жидкость — пар для воды

$P$ , МПа	$t$ , °C	$\Delta v$ , м <sup>3</sup> /кг	$L$ , кДж/кг	$P\Delta v$
0,02	60,1	7,65	2358	153
0,1	99,6	1,89	2258	169
0,5	151,8	0,374	2108	187
1,0	179,9	0,193	2014	193
5,0	282,9	$38,4 \cdot 10^{-3}$	1838	191
10,0	311,0	$16,5 \cdot 10^{-3}$	1316	165
15,0	342,1	$8,7 \cdot 10^{-3}$	999	130

$T_K = 647,27 \text{ K}$  [374,12 °C],  $v_K = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ , темп-ра  $t$  дана в °C). Произведение  $P\Delta v$  с ростом давления меняется незначительно и составляет 10–13% от полной теплоты П. в широком интервале давлений.

Лит.: С и в у х и н Д. В., Общий курс физики, 2 изд., т. 21, М., 1979; Н о в и к о в И. И., Термодинамика, М., 1984.

**ПАРСЕК** (пк, ср.) — единица длины в астрономии, равная расстоянию до звезды, годичный паралакс которой  $1''$ . 1 пк равен 206 265 а. е. или  $3,0857 \cdot 10^{16}$  м.



**ПАРТОНЫ** (от лат. parts, род. падеж partis — часть) — общее название составляющих адрона, проявляющихся в процессах с большой передачей импульса (в жестких процессах), а также в множественных процессах. Модель П. предложена Р. Фейнманом (Р. Feynman) в 1969 для объяснения различия в характере поведения сечений высокоэнергетич. упругого рассеяния и глубоко неупругого рассеяния электрона на протоне на большие углы: упругий процесс происходит как на протяженном объекте, а глубоко неупругий — как на точечном. Фейнман объяснил это различие, предположив, что протон состоит из точечных частиц — П., к-рые проявляются во взаимодействиях лишь при больших переданных импульсах (т. е. на малых расстояниях). Дальнейшее изучение партонной модели и сопоставление её предсказаний для жестких процессов с экспериментом позволило отождествить П. с кварками и глюонами, взаимодействие к-рых описывается квантовой хромодинамикой (КХД).

Согласно кварковой модели, адрон состоит либо из трёх кварков, либо из кварка и антикварка. В квартовой теории поля из-за эффекта поляризации вакуума каждый кварк (антикварк) окружен облаком глюонов и кварк-антикварковых пар. Вследствие этого релятивистский адрон в модели П. представляется как когерентная совокупность бесконечного числа кварков, антикварков и глюонов. При этом разность чисел кварков и антикварков каждого типа (аромата), т. е. число валентных кварков, конечно и определяет аддитивные квантовые числа адрона (электрич. заряд, странность, барионное число и т. д.). Так, протон содержит два валентных *u*-кварка, один валентный *d*-кварк, а также море кварк-антикварковых пар (т. н. морских кварков и антикварков) и глюонов.

Каждый нач. адрон участвует в реакциях лишь одним, активным П., несущим (приближенно, с точностью до  $M^2/Q^2$ , где  $M$  — масса адрона, а  $Q^2 = M^2 - \text{квадрат}$  характерной передачи 4-импульса в жестком процессе) нек-рую долю  $x$  продольного 4-импульса  $p$  адрона (используется система единиц, в к-рой  $c = 1$ ). Т. о., 4-импульс  $k$  партона равен:  $k = xp + k_T$ , где  $k_T$  — поперечная составляющая 4-импульса П. ( $p \cdot k_T = 0$ ). Плотность числа П. сорта  $a$  в адроне  $A$  наз. функцией распределения  $f_{a/A}(x)$ .

Рассеянные, активные, П. и невзаимодействовавшие «остатки» нач. адронов (совокупность  $p$  с  $a$  и  $v$  ных П., или П.-спектров, от англ. spectator — наблюдатель) превращаются в струи адронные, имеющие тот же импульс, ср. электрич. заряд, барионное число и др. сохраняющиеся квантовые числа (за исключением цвета), что и породивший их П. (или остаток адрона). Плотность распределения числа адронов  $A$  в струе по долям  $x$  продольной компоненты 4-импульса (относительно 4-импульса исходного партона  $a$ ) описывается функцией фрагментации  $D_{A/a}(z)$ .

Напр., глубоко неупругий процесс рассеяния электрона на протоне выглядит в модели П. след. образом. Электрон с 4-импульсом  $l$  упруго рассеивается на П. с 4-импульсом  $xp$  и приобретает 4-импульс  $l'$  (рис. 1;  $\gamma^*$  — виртуальный фотон). Далее рассеянный П. и пассивный остаток протона превращаются в две адронные струи, одна из к-рых летит в направлении виртуального фотона, а другая — в направлении первичного протона. Т. к. соударение упругое, то массы начального и конечного П. равны, т. е.  $(q + xp)^2 = x^2 p^2$ , где  $q = l' - l$  — переданный партону 4-импульс. Отсюда следует, что рассеивающийся электрон взаимодействует только с П., несущим долю  $x$  импульса, равную  $x = Q^2/2(pq)$ , где  $Q^2 = -q^2$ . Если  $f_{a/p}(x)$  — число таких П. сорта  $a$  в протоне  $p$ , а  $c_a$  — заряд партона  $a$  (в единицах элементарного электрич. заряда), то дифференц.

сечение глубоко неупругого рассеяния (ГНР) равно: 
$$\frac{d\sigma}{dx dQ^2} = \sum_a \left( \frac{d\sigma}{dQ^2} \right)_{\text{упр}} f_{a/p}(x),$$
 где  $(d\sigma/dQ^2)_{\text{упр}} \sim \alpha_e^2/(Q^2)^2$  — сечение упругого рассеяния электрона на точечной частице ( $\alpha = 1/137$  — постоянная тонкой структуры). Т. о., структурные функции ГНР в модели П., в отличие от факторов упругого рассеяния, зависят только от отношения  $Q^2/2pq$ . Аналогично ГНР рассматриваются и др. жесткие процессы, напр. рождение пары мюонов с большой относит. энергией в адрон-адронном соударении.  $A + B \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ , где  $X$  — совокупность вторичных адронов (рис. 2, а) или рождение адрона (C) с большим поперечным отношением оси соударения импульсов.  $A + B \rightarrow C + X$  (рис. 2, б;  $g$  — глюон). Сечение каждого из

сечений глубоко неупругого рассеяния (ГНР) равно:

$$\frac{d\sigma}{dx dQ^2} = \sum_a \left( \frac{d\sigma}{dQ^2} \right)_{\text{упр}} f_{a/p}(x),$$

где  $(d\sigma/dQ^2)_{\text{упр}} \sim \alpha_e^2/(Q^2)^2$  — сечение упругого рассеяния электрона на точечной частице ( $\alpha = 1/137$  — постоянная тонкой структуры). Т. о., структурные функции ГНР в модели П., в отличие от факторов упругого рассеяния, зависят только от отношения  $Q^2/2pq$ .

Аналогично ГНР рассматриваются и др. жесткие процессы, напр. рождение пары мюонов с большой относит. энергией в адрон-адронном соударении.  $A + B \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ , где  $X$  — совокупность вторичных адронов (рис. 2, а) или рождение адрона (C) с большим поперечным отношением оси соударения импульсов.  $A + B \rightarrow C + X$  (рис. 2, б;  $g$  — глюон). Сечение каждого из

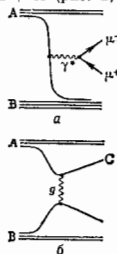


Рис. 2.

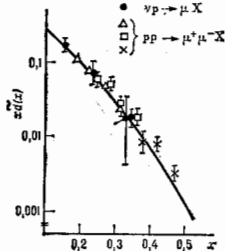


Рис. 3.

них определяется ф-ция распределения П. в исходных адронах  $A$  и  $B$  и ф-цией фрагментации рассеянного П. в конечный адрон  $C$ , к-рые не зависят от вида процесса, и сечениями партонных подпроцессов — аннигиляцией П. и (морского) антипротона в пару  $\mu^+ \mu^-$  в первом случае и П.-партонным рассеянием — во втором. Т. о., модель П. даёт возможность установить связь между сечениями разл. процессов. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведено сравнение распределений антикварков  $\bar{d}$  в протоне, полученных из процессов ГНР нейтрно на протоне и рождения пары.

Модель П. используется также для феноменол. описания множественных сечений рождения мезонов  $M$  с малыми поперечными импульсами в области фрагментации и низионными множественными процессами. В качестве подпроцессов используются реакция слияния кварка (или антикварка) фрагментирующего адрона с антикварком (кварком) из моря второго адрона (рис. 4, а) или из вакуума (рис. 4, б), а дифференц. сечение пропорц. распределению кварков в фрагментирующем адроне в первом случае и произведению соответствующих распределений — во втором. Сам же подпроцесс слияния характеризуется нек-рой феноменол. константой.

Равенство аддитивных зарядов адрона и его импульса сумме зарядов и продольных составляющих импульсов П. и аналогичное равенство для адронов партонной струи приводит для ф-ций распределения и фрагментации к зарядовым и импульсным правилам сумм:

$$\sum_a c_a \int_0^1 f_{a/A}(x) dx = C_A; \quad \sum_a C_A \int_0^1 D_{A/a}(z) dz = C_a; \quad (1)$$

$$\sum_a \int_0^1 x f_{a/A}(x) dx = 1; \quad \sum_a \int_0^1 z D_{A/a}(z) dz = 1, \quad (2)$$

где  $c_0(C, A)$  — величина сохраняющегося заряда (электрич. заряда, барионного числа и др.) нуклона  $A$  (адрона  $A$ ), а суммирование производится по всем сортам  $\Pi$  и антиадронам (адронам и антиадронам).

Поведение  $f$ -ций распределения кварков- $\Pi$  в области малых  $x$  может быть связано с поведением полных сечений фотопоглощения виртуального  $\gamma$ -кванта на адроне при большой полной энергии в системе центра инерции  $\epsilon_{ц.и.} \approx \sqrt{Q^2}$  и определяется в *Режеке полюсов* методе обменом режеконом для валентных кварков- $\Pi$ .  $q_V$ , т. е. для комбинации распределений  $q_V(x) = |q_A(x) - \bar{q}_A(x)|$ , и обменом помером для морских  $\Pi$ , т. е. для комбинации  $O(x) = |q_A(x) - q_V(x)$  (совпадающей с плотностью распределения виртуальных пар кварк-антикварк) и глюонов. Вследствие этого указанные комбинации ведут себя в пределье  $x \rightarrow 0$  соответственно как  $1/\sqrt{x}$  и  $1/x$ . В др. пределье  $x \rightarrow 1$  оно связано со степенью убывания фактора адрона с ростом  $Q^2$  и, согласно кваркового счёта правилам (см. также *Атомодельная асимптотика*), определяется числом  $n_{\text{пасс}}$  пассивных кварков- $\Pi$ :

$$f(x) \sim (1-x)^{2n_{\text{пасс}}-1}.$$

Напр., для распределения валентных  $u$ -кварков в протоне это даёт  $u_V(x) \sim (1-x)^2$  ( $n_{\text{пасс}} = 2$ ), а для морских кварков и антикварков  $O(x) \sim (1-x)^4$  ( $n_{\text{пасс}} = 4$ ). Аналогичные предельные поведения с заменой  $x$  на  $1-x$  справедливы и для  $f$ -ций фрагментации.

Наилучшим процессом для эксперим. измерения кварк-нуклоновых распределений является ГНР нейтрино и антинейтрино,  $K$ -рые взаимодействуют с разными кварками: нейтрино с  $d$ - и  $u$ -кварками, антинейтрино с  $\bar{d}$  и  $\bar{u}$ . Эти распределения для валентных  $u$ -кварков  $z u_V(x)$  и морских антикварков  $z(\bar{d}(x) + \bar{s}(x))$  в протоне показаны на рис. 5, а. Видно, что импульсный спектр морских кварков мягче спектра валентных кварков;

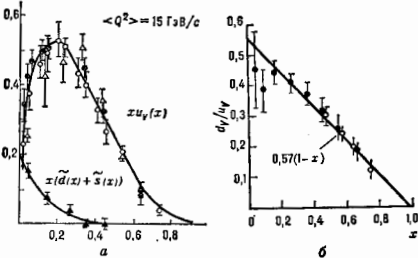


Рис. 5.

это качественно согласуется с использовавшимся ранее представлением о нуклоне, как о состоянии из центр. ядра (керна), окруженного облаком мезонов. На рис. 5(б) показано отношение распределений  $dy(x)/u_V(x)$ . Сплошные линии — простейшие параметризации этих распределений:

$$z u_V(x) = 2,04 \sqrt{x}(1-x)^{2,5};$$

$$dy(x)/u_V(x) = 0,57(1-x);$$

$$zO(x) = 0,1(1-x)^6.$$

Из этих данных видно, что валентные кварки несут ок. 35% полного импульса протона, морские — ок. 10%. Остальные 55% приходятся на долю глюонов. Непосредственно распределение глюонов измеряется в процессе рождения тяжёлых кварконов (например,

$J/\psi$ -частицы) в ГНР (рис. 6) и имеет вид  $zg(x) \approx 3,3(1-x)^5$ .

Для измерения распределения  $\Pi$  в других (нестабильных) частицах используется процесс рождения мюонных пар (рис. 2, а).

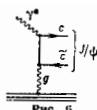


Рис. 6.

Для измерения  $f$ -ций фрагментации наиб. подходящим процессом считается рождение адронных струй в процессе  $e^+e^-$ -аннигиляции.

Модель  $\Pi$  для жёстких процессов получила теоретич. обоснование и уточнение в КХД, где она является следствием свойства факторизации сечений жёстких процессов. Уточнения сводятся к слабой (логарифмич.) зависимости  $f$ -ций распределений и фрагментации от  $Q^2$ ,  $K$ -рая определяется ур-ниями эволюции кварков- $\Pi$ ,  $\alpha_s$  от  $Q^2$  и к отходу от точности  $\Pi$ , т. е. к учёту неургулых подпроцессов и радиационных поправок по теории возмущений КХД.

Ур-ния эволюции приводят к росту структурных  $f$ -ций с увеличением  $Q^2$  в области малых  $x$ ,  $x < 0,2$ , при этом ср. доля импульса валентных кварков уменьшается, а ср. доли импульса морских кварков и глюонов стремятся к пост. значениям, равным  $3\pi_j/16 + 3\pi_j$  и  $16/(16 + 3\pi_j)$ , где  $\pi_j$  — число ароматов кварков. Суммарная же доля импульсов всех  $\Pi$  [соотношения (2)] и их суммарные заряды [соотношения (4)] не зависят от  $Q^2$ . Эти изменения  $f$ -ций распределения и фрагментации подтверждаются экспериментально.

Т. о., модель  $\Pi$  к кон. 1980-х гг. является как основой приложения КХД к жёстким процессам, так и основой мн. феноменологич. моделей взаимодействия адронов.

Лит.: Фейнман Р. Взаимодействие фотонов с адронами, пер. с англ., М., 1975; Клоуз Ф., Кларк и партнеры, пер. с англ., М., 1982; Радюшкин А. В. Аппарат жёстких инклюзивных процессов в квантовой хромодинамике, СЧАЯ, 1983, т. 14, с. 58; Волости М. В., Тер-Мартirosян К. А., Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц, М., 1984.

А. В. Ефремов.

**ПАРЦИАЛЬНАЯ ВОЛНА** (от ср.-век. лат. *partialis* — частичный) — волна с определённым орбитальным (угловым) моментом  $l$ . Значениями  $l = 0, 1, 2, \dots$  соответствуют  $S$ -,  $P$ -,  $D$ -волны и т. д. См. *Рассеяние микрочастиц*.

**ПАРЦИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ** — часть общего давления, относящаяся к одному из компонентов газовой смеси. Равно давлению,  $K$ -рое он оказывал бы в отсутствие всех др. компонентов смеси, т. е. в том случае, когда масса данного компонента, содержащаяся в газовой смеси, одна занимала бы весь объём. Понятие П. д. применимо только к идеальным газам. Молярное П. д.  $i$ -го компонента газовой смеси с общим давлением  $p$  равно:  $p_i = N_i p$ , где  $N_i$  — отношение числа молей данного компонента к сумме молей всех компонентов смеси (см. *Дальтона законы*).

П. д. непосредственно измерить нельзя, его вычисляют исходя из общего давления и состава смеси. П. д. необходимы для расчёта фазовых равновесий разл. физ.-хим. процессов.

Ю. Н. Любитов.

**ПАРЦИАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ** — сечение взаимодействия для *парциальной волны*.

**ПАРЦИАЛЬНЫЕ ШИРИНЫ** — величины  $\Gamma_i$ , характеризующие вероятность распада возбуждённого состояния ядра по разл. каналам. П. ш. выражаются в энергетич. единицах таким образом, что  $\sum \Gamma_i = \Gamma$ , где  $\Gamma$  — полная ширина возбуждённого уровня. Отношение  $\Gamma_i/\Gamma$  — вероятность распада по  $i$ -му каналу. Нестабильные ядерные состояния характеризуются одной или неск. П. ш.: нейтронной  $\Gamma_n$ , протонной  $\Gamma_p$ , делительной  $\Gamma_d$ , радиационной  $\Gamma_\gamma$  и т. д. В свою очередь, если возможны  $\gamma$ -переходы на разл. уровни ядра — продукта распада, то выделяет, напр.,  $\Gamma_\gamma$ ,  $\Gamma_\gamma'$ .

**ПАСКАЛЬ** (Па, Pa) — единица СИ давления, механич. напряжения и модуля упругости. Названа в честь

Б. Паскаля (В. Pascal), 1 Па равен давлению, создаваемому силой в 1 Н, равномерно распределённой по поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>. 1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup> = = 10 дин/см<sup>2</sup> = 0,102 кгс/м<sup>2</sup> = 10<sup>-6</sup> бар = 9,87 · 10<sup>-6</sup> атм = 7,50 · 10<sup>-3</sup> мм рт. ст.

**ПАСКАЛЯ ЗАКОН** — осн. закон гидростатики, согласно к-рому давление на поверхности жидкости, произведённое внеш. силами, передаётся жидкостью одинаково во всех направлениях. Установлен Б. Паскалем, опубликован в 1663.

**ПАСКАЛЯ ПРАВИЛО** — см. Магнетизм.

**ПАУЛИ МАТРИЦЫ** — двухрядные комплексные эрмитовы матрицы

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Введены В. Паули (W. Pauli, 1927) для описания собств. механч. момента (спина)  $s = \frac{1}{2}\hbar\sigma$  и магн. момента  $\mu = (eh/2mc)\sigma$  электрона (см. Паули уравнение).

Благодаря перестановочным соотношениям

$$\sigma_i\sigma_k - \sigma_k\sigma_i = 2\epsilon_{ikl}\sigma_l$$

(где  $\epsilon_{ikl}$  — Леви-Чивиты символ) компоненты спина  $s$  удовлетворяют перестановочным соотношениям для угл. момента. При повороте на угол  $\phi$  вокруг оси  $s$  направляющим вектором  $n(n_1, n_2, n_3)$  задающий волновую ф-цию электрона двухкомпонентный спинор  $\psi = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix}$  преобразуется по ф-ле

$$\psi \rightarrow \psi' = \exp\left(-\frac{i\phi}{2}\mathbf{n}\sigma\right)\psi,$$

реализуя простейшее спинорное представление вращений группы  $SO(3)$ . В качестве базиса в пространстве этого представления можно взять, напр., собств. векторы матриц  $\sigma_3$ ,  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$  и  $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$  с собств. значениями 1 и  $-1$  соответственно.

П. м. используются при описании любой квантовой системы с дискретной переменной, принимающей два значения. Помимо спина классич. примером является система протон — нейтрон; её дискретную переменную изм. 3-й компонентой изотопического спина (обычно П. м. обозначают в этом случае символами  $\tau_i$ ,  $i = 1, 2$ ). Поскольку  $SO(3)$  локально изоморфна группе унитарных унитарных комплексных матриц [точнее,  $SO(3) \sim SU(2)/Z_2$ , см. Группы], в терминах П. м. описываются калибровочные поля с унитарной симметрией  $SU(2)$ . П. м. используются также в многочисл. моделях квантовых систем на решётках (разл. варианты Изинга модели и т. п.).

Лит.: Паули В. Труды по квантовой теории [пер. с нем.], т. 1—2, М., 1975—77; Дуболяв В. А., Новиков С. П., Фоменко А. Т., Современная геометрия, 2 изд., М., 1986; Медведев Б. В., Начала теоретической физики, М., 1977. В. П. Павлов.

**ПАУЛИ ПАРАМАГНЕТИЗМ** — спиновый парамагнетизм вырожденного идеального газа электронов проводимости (в общем случае — газа фермионов).

Существование П. п. у металлов было теоретически обосновано В. Паули в 1927 на основе Ферми — Дирака статистики электронов проводимости и Зеемана эффекта.

Зеемановское расщепление энергетич. зоны электронов (см. Зонная теория) в магн. поле  $H$  на две подзоны с противоположными проекциями спина сопровождается нарушением компенсации, заселённости подзон (отвечающей распределению Ферми — Дирака). Более заселённой оказывается нижележащая (низкоэнергетич.) подзона, у электронов к-рой спиновый магнитный момент направлен по полю. В результате возникает positif. спиновая намагнитченность (парамагнетизм). Её значение при произвольном виде плотности электронных состояний в зоне  $N(\mathcal{E})$  и  $H \rightarrow 0$  определяют численными методами из выражения

$$M(T, H \rightarrow 0) = \frac{1}{4}g^2\mu_B^2 H^2 \int N(\mathcal{E}) \left[ -\partial(\mathcal{E}/\mu) \partial \mathcal{E} \right] d\mathcal{E} \quad (1)$$

[эмпирический потенциал  $\mu(T)$  в ф-ции распределения Ферми — Дирака  $f(\mathcal{E}, \mu)$  задается условием постоянства общего числа электронов  $n = \int N(\mathcal{E}) f(\mathcal{E}, \mu) d\mathcal{E}$ ,  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $\mu(0) = \mathcal{E}_F$  — ферми-энергия]. Спин-орбитальное взаимодействие при расчётах считается слабым, усреднённая по электронным состояниям в окрестности  $\mathcal{E}_F$  величина Ланде множителя близка к значению  $g = 2$  для свободных электронов.

При сильном вырождении ( $kT$ ,  $\mu_B H \ll \mathcal{E}_F$ ) для вычисления спиновой парамагн. восприимчивости  $\chi_H$  используется разложение (1) до членов  $\sim T^2$ , к-рое описывает характерное для этой области насыщение классич. температурной зависимости

$$\chi_H(T) = \frac{1}{4}g^2\mu_B^2 N(\mathcal{E}_F) \left[ 1 + \frac{(kT)^2}{6} \frac{d^2 \ln N(\mathcal{E})}{d\mathcal{E}^2} \right]_{\mathcal{E}=\mathcal{E}_F} \quad (2)$$

Из этой ф-лы видно, что в первом приближении П. п. не зависит от темп-ры.

Величина и температурное поведение П. п. непосредственно связаны с видом ф-ции  $N(\mathcal{E})$  вблизи энергии Ферми  $\mathcal{E}_F$ , а переход П. п. к классич. парамагнетизму определяет вырождение температуры  $T_0 = \mathcal{E}_F/k$ . Напр., в жидком <sup>3</sup>He (см. Гелий жидкий) представляющим ферми-систему ядер, такой переход наблюдается при  $T_0 \approx 1$  К, тогда как для газа свободных электронов в металле он недостижим ( $T_0 \sim 10^5$  К). В реальных металлах, системах со сложным многозонным дисперсионным законом величина  $T_0$  задают ближайшие к фермиуровню край перекрывающихся зон и др. экстремальные значения энергии  $\mathcal{E}_k$ , к-рым соответствуют особые точки и тонкая структура ф-ции  $N(\mathcal{E})$ . В случае  $|\mathcal{E}_F - \mathcal{E}_k| = kT_0 \ll \mathcal{E}_F$  характерные для перехода в классич. область аномалии спиновой восприимчивости проявляются при довольно низких темп-рах на фоне регулярного П. п. от вырожденных зон (напр., в Pd  $T_0 \approx 100$  К).

Коллективная кристаллич. решётки, влияющие на ф-цию  $N(\mathcal{E})$ , несколько видоизменяют температурную зависимость П. п. Однако более существенную роль играют межэлектронные взаимодействия. Так, обменное взаимодействие повышает кулоновскую энергию электронов с одинаковым направлением спина, удерживая их вдали друг от друга (см. Паули принцип). Это способствует спиновой поляризации взаимодействующих электронов и усиливает спиновый парамагнетизм:

$$\chi_{\text{ус}} = \chi_H / (1 - \alpha\chi_H) = S\chi_H \quad (3)$$

(здесь  $\alpha$  — параметр эфф. обменно-корреляц. взаимодействия и средней поля приближения,  $\chi_{\text{ус}}$  — магн. восприимчивость усилённого парамагнетизма). В системах с высокой плотностью состояний фактор усиления  $S$  может достигать больших значений [напр.,  $S(T=0) \approx \approx 10$  в Pd и  $\approx 50$  в TiVb] вплоть до появления спонтанной намагнитченности при выполнении Стокера критерия ферромагнетизма:  $\alpha\chi_H \geq 1$ . В меру величины  $S$  проявляется коллективный характер термич. возбуждений в виде спин-флуктуат. добавки к параметру  $\alpha$  в (3), к-рая может доминировать в поведении намагнитченности  $M(T, H)$  систем, близких к ферромагн. неустойчивости.

Наблюдение и однозначная интерпретация П. п. затруднены присутствием соизмеримых вкладов — диамагнетизма ионов и электронов проводимости в простых металлах и ван-дерваальсово парамагнетизма в переходных металлах. Ряд явлений — электронный парамагн. резонанс, гиромагн. явления и сдвиг Найта — помогает выделить П. п. из общей намагнитченности и исследовать его зависимость от темп-ры и магн. поля.

П. п. служит источником полезных сведений об энергетич. спектре и взаимодействиях электронов в системах с металлами, проводимостью.

Лит.: В о с с о в е н и я С. В., Магнетизм, М., 1971; У а й т Р., Квантовая теория магнетизма, пер. с англ., 2 изд.,

М., 1985; М о р я н Т., Последние достижения теории магнетизма коллективизированных электронов, «УФН», 1981, т. 135, с. 117. И. В. Свечкарёв.

**ПАУЛИ ПРИНЦИП** — фундамент. закон природы, заключающийся в том, что в квантовой системе две тождественные частицы с полуцелым спином не могут одновременно находиться в одном состоянии. Сформулирован в 1925 В. Паули для электронов в атоме и назван им в принципе запрета, затем распространён на любые фермионы. В 1940 Паули показал, что принцип запрета — следствие существующей в квантовой теории поля связи спина и статистики; частицы с полуцелым спином подчиняются Ферми — Дирака статистике, поэтому волновая ф-ция системы одинаковых фермионов должна быть антисимметричной относительно перестановки любых двух фермионов; отсюда и следует, что в одном состоянии может находиться не более одного фермиона.

П. п. сыграл решающую роль в понимании закономерностей заполнения электронных оболочек атома, послужил исходным пунктом для объяснения атомных и молекулярных спектров. Фундаментальна роль П. п. в квантовой теории твёрдого тела и атомного ядра, а также в теории ядерных реакций и реакций между элементарными частицами.

Естественный для физики вопрос о том, с какой точностью П. п. подтверждается опытом, для самой своей постановки требует пересмотра ряда осн. положений квантовой теории. Такой альтернативной непротривольной схемы не существует, характеристике отклонений нельзя говорить о к-рости, характерные отклонения от П. п. в рамках совр. представлений физики вынуждены считать, что П. п. является абсолютно строгим.

Лит.: Л о б а т о в Г., З и м л о в В., Connection between spin and statistics, «Phys. Rev.», 1938, т. 41, p. 1430. Теоретическая физика 20 века. (Памяти В. Паули. Перевод), М., 1962; Ст р и т е р Р., В а й т м а н А. С., РСТ, спин и статистика и всё такое, пер. с англ., М., 1966; Па у л и В., Физические основы, сб. ст., пер. с англ., М., 1975, с. 85; ст. о ж. е. Гугуа по квантовой теории, пер. с нем., т. 1—2, М., 1975—77; Ф е я н м а н Р., Почему существуют античастицы, пер. с англ., «УФН», 1969, т. 137, с. 163. Л. Б. Окунь, В. П. Павлов.

**ПАУЛИ ТЕОРЕМА** — устанавливает связь спина со статистикой (В. Паули, 1940) и утверждает, что поля, описывающие частицы с целым спином, квантуются по Бозе — Эйнштейну, а с полуцелым — по Ферми — Дираку. Соответственно все частицы подразделяются на бозоны и фермионы. П. т. фиксирует характер перестановочных соотношений между операторами рождения и уничтожения частиц: бозонные операторы связаны отношениями коммутации, фермионные — антикоммутации. Из-за возможности взаимного превращения частиц операторы рождения и уничтожения разл. фермионов также следует считать антикоммутирующими. П. т. обосновывает принцип запрета Паули релятивистской квантовой механики — невозможность нахождения двух электронов в одном и том же квантовом состоянии. Доказательство П. т. основывается на условиях микроэрмитичности, а именно: использует независимость операторов полей в точках, раздельных пространственноподобным интервалом. При этом важна локальность квантовой теории поля (КТП). При формулировке КТП с помощью функционального интеграла П. т. заставляет описывать поля с полуцелым спином грассмановыми (антикоммутирующими) числами (см. Грассмана алгебра).

На первый взгляд П. т. делает невозможным симметричное описание частиц с целыми и полуцелыми спинами. Такое описание ставится, однако, возможным при введении наряду с обычной пространственно-временной координатой  $x_\mu$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ ) грассмановых координат  $\theta$ . Коэф. разложения поля (суперполя)  $S(x, \theta)$  в ряд по  $\theta$  являются бозонными и фермионными полями. Простейший пример отвечает одной грассмановой переменной. При этом суперполе  $S(x, \theta)$  имеет вид  $S(x, \theta) = \varphi(x) + \theta\psi(x)$ . Ряд по  $\theta$  обрывается, т. к.  $\theta^2 = 0$ . Компоненты суперполя  $\varphi$  и  $\psi$  описыва-

ют соответственно бозон и фермион. Бозонно-фермионная симметрия получила назв. суперсимметрии.

Лит.: Па у л и В., Релятивистская теория элементарных частиц, пер. с англ., М., 1947; В о г о л о б о в И. П., Ш и р к о в Д. В., Введение в теорию квантовых полей, 4 изд., М., 1984. М. И. Высоцкий.

**ПАУЛИ УРАВНЕНИЕ** — ур-ние релятивистской квантовой механики, описывающее движение заряж. частицы со спином  $1/2$  (напр., электрона) во внеш. эл.-магн. поле. Предложено В. Паули в 1927.

П. у. является обобщением Шрёдингера уравнения, учитывающим наличие у частицы собственного механич. момента импульса — спина. Частица со спином  $1/2$  может находиться в двух разл. спиновых состояниях с проекциями спина  $+1/2$  и  $-1/2$  на вектор произвольно выбранное направление, принимаемое обычно за ось  $z$ . В соответствии с этим волновая функция частицы  $\psi(r, t)$  (где  $r$  — координата частицы,  $t$  — время) является двухкомпонентной:

$$\psi(r, t) = \begin{pmatrix} \Psi_1(r, t) \\ \Psi_2(r, t) \end{pmatrix}.$$

При поворотах координатных осей  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  преобразуются как компоненты спинора. В пространстве спиновых волновых ф-ций скалярное произведение  $\psi$  и  $\psi'$  имеет вид

$$(\psi', \psi) = \int (\psi_1'^* \psi_1 + \psi_2'^* \psi_2) dr,$$

операторы физ. величин являются матрицами  $2 \times 2$ , к-рые для величин (наблюдаемых), не зависящих от спина, кратны единичной матрице.

В силу общих законов электродинамики электрически заряженная система с отличным от нуля спиновым моментом  $s$  обладает и магн. моментом, пропорциональным  $s$ :  $\mu = g\mu_B$  ( $g$  — гиромагн. отношение). Для орбитального момента  $g = e/2mc$ , где  $e$  — заряд,  $m$  — масса частицы; спиновое гиромагн. отношение оказывается в два раза большим:  $g = e/mc$ . Во внеш. магн. поле наивысшие в  $B$  магн. момент обладает потенц. энергией  $U = -\mu B$ , добавление  $k$ -рой в гамилтониан  $H$  электрона во внеш. з-д.-магн. поле с потенциалами  $\varphi$  и  $A$  приводит к П. у.:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi; \quad H = \left( \frac{p - \frac{e}{c}A}{2m} \right)^2 I - \frac{e\hbar}{2mc}(\sigma B) + e\varphi I, \quad (1)$$

где  $p$  — оператор импульса,  $\sigma$  — Паули матрицы [оператор спина  $s = (\hbar/2)\sigma]$ .

Предложение первоначально на основе эвристик, соображений П. у. оказалось естеств. следствием релятивистски-инвариантного Дирака уравнения в слабо-релятивистском приближении, в к-ром учитываются лишь первые члены разложения по обратным степеням скорости света.

Если напряжённости внеш. магн. поля не зависят от пространств. координат, то орбитальное движение частицы и изменение ориентации её спина происходит независимо. Волновая ф-ция при этом имеет вид  $\psi(r, t) = \Phi(r, t)\chi(t)$ , где  $\Phi(r, t)$  — скалярная ф-ция, удовлетворяющая ур-нию Шрёдингера, а спинор  $\chi = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{pmatrix}$  удовлетворяет ур-нию

$$i\hbar \frac{\partial \chi}{\partial t} = - \frac{e\hbar}{2mc}(\sigma B)\chi.$$

Из этого ур-ния следует, что ср. значение спина  $\langle s \rangle = \frac{\hbar}{2} (\chi_1^* \chi_2)$  прецессирует вокруг направления магн. поля:

$$\frac{d}{dt} \langle s \rangle = - \omega_B n \langle s \rangle.$$

Здесь  $\omega_B = eB/mc$  — циклотронная частота,  $n$  — единичный вектор вдоль магн. поля.

На основе П. у. может быть рассчитано расщепление урвнй энергии электронов в атоме во внеш. магн. по-

ле с учётом спина (*Зеемана эффект*). Однако более тонкие релятивистские эффекты в атомах, обусловленные спином электрона, могут быть описаны лишь при учёте более высоких членов разложения релятивистского ур-ния Дирака по обратным степеням скорости света (см. *Тонкая структура*).

**ПАШЕНА ЗАКОН** — устанавливает, что наим. напряжение зажигания газового разряда между двумя плоскими электродами есть величина постоянная (характерная для данного газа) при одинаковых значениях произведения  $pd$ , где  $p$  — давление газа,  $d$  — расстояние между электродами. Сформулирован Ф. Пашеном (F. Paschen) в 1889. П. з. — частный случай закона подобия газовых разрядов: явления в разряде протекают одинаково, если при увеличении или уменьшении давления газа во столько же раз уменьшить или соответственно увеличить размеры разрядного промежутка, сохраняя его форму геометрически подобной исходной. П. з. справедлив с тем большей точностью, чем меньше  $p$  и  $d$ . См. также *Зееманова потенция*.

**ПАШЕНА СЕРИЯ** — спектральная серия в спектрах атома водорода и водородоподобных ионов. В спектрах испускания П. с. получается при всех разрешённых излучательных квантовых переходах атома  $H$  (и  $H$ -подобных ионов) на уровень энергии с гл. квантовым числом  $n = 3$  со всех вышележащих уровней энергии с  $n_i > n$  (в спектрах поглощения — при обратных переходах).

**ПАШЕНА — БАКА ЭФФЕКТ** — состоит в том, что в сильных магн. полях сложное зеемановское расщепление спектральных линий переходит в простое (см. *Зеемана эффект*). Сильными следует считать магн. поля напряжённостью  $H$ , вызывающие расщепление уровней энергии  $\Delta\epsilon = \mu_B H$  ( $\mu_B$  — магнетон Бора), превышающее расщепление *тонкой структуры*. В таких полях проскакивает упрощение картины расщепления — наблюдается расщепление линии на три компоненты (зеемановский триплет). Обнаружен Ф. Пашеном и Э. Баком (E. Back) в 1912.

**ПЕКЛЕ ЧИСЛО** — безразмерное число, являющееся подобной критерием для процессов конвективного теплообмена. Названо по имени Ж. К. Пекле (J. C. Peclet). П. ч.  $Pe = v/a = c_p \rho v l / (\lambda l)$ , где  $l$  — характерный линейный размер поверхности теплообмена,  $v$  — скорость потока жидкости относительно поверхности теплообмена,  $a$  — коэф. температуропроводности,  $c_p$  — теплоёмкость при пост. давлении,  $\rho$  — плотность и коэф. температуропроводности жидкости или газа. Число  $Pe$  характеризует отношение между конвективным и молекулярным процессами переноса теплоты в потоке жидкости или газа. При малых значениях  $Pe$  преобладает молекулярная теплопроводность, при больших  $Pe$  — конвективный перенос теплоты. П. ч. связано с Рейнольдса числом  $Re$  и Прандтля числом  $Pr$  соотношением  $Pe = Re \cdot Pr$ .

**ПЕЛЬТЬЕ ЭФФЕКТ** — выделение или поглощение тепла на контакте двух разнородных проводников в зависимости от направления электрич. тока, текущего через контакт. Открыт Ж. Пельтье (J. Peltier) в 1834. Мощность тепловыделения  $Q = I_{12} j$ , где  $j$  — плотность тока,  $I_{12} = P_{12} - P_2(P_1, P_2 = \text{абс. коэф. Пельтье контактирующих материалов, являющихся характеристиками этих материалов}$ ). Причина возникновения П. з. заключается в том, что ср. энергия носителей заряда (для определённости электронов), участвующих в электропроводности, в разл. проводниках

различна, т. к. зависит от их энергии, спектра, концентрации и механизма рассеяния (см. *Рассеяние носителей заряда*). При переходе из одного проводника в другой электроны либо передают избыточную энергию решётке, либо пополняют недостаток энергии за её счёт (в зависимости от направления тока). В первом случае вблизи контакта выделяется, а во втором — поглощается т. н. тепло Пельтье. Напр., на контакте полупроводник — металл (рис.) энергия электронов, переходящих из полупроводника  $n$ -типа в металл (левый контакт), значительно превышает энергию Ферми  $\epsilon_F$ . Поэтому они нарушают тепловое равновесие в металле. Равновесие восстанавливается в результате столкновений, при к-рых электроны термализуются, отдавая избыточную энергию кристаллич. решётке. В полупроводник из металла (правый контакт) могут перейти только самые энергичные электроны, вследствие этого электронный газ в металле охлаждается. На восстановление равновесного распределения расходуется энергия колебаний решётки.

На контакте двух полупроводников или двух металлов также выделяется (или поглощается) тепло Пельтье, вследствие того, что ср. энергия участвующих в токе носителей заряда по обе стороны контакта различна. Выражение для абс. коэф. Пельтье  $\Pi$  (носители заряда — электроны) имеет вид

$$\Pi = \frac{1}{e} \left[ \int_0^{\infty} v f_1(\epsilon) d\epsilon g(\epsilon) - \epsilon_F \right], \quad (1)$$

где  $\epsilon$ ,  $v$  — кинетич. энергия и скорость электронов,  $f_1$  — неравновесная часть ф-ции распределения электронов,  $g(\epsilon)$  — плотность состояний. Как видно из (1), коэф.  $\Pi$  представляет собой отклонение ср. энергии носителей в потоке от энергии Ферми  $\epsilon_F$ , отнесённое к единице заряда. Для определения  $\Pi$  необходимо знать ф-цию  $g(\epsilon)$  и найти  $f_1(\epsilon)$ , т. е. решить кинетич. ур-ние.

В случае параболич. закона дисперсии электронов проводимости  $\epsilon(p)$  ( $p$  — квазиимпульс) и степенной зависимости длины свободного пробега  $l$  от энергии при отсутствии вырождения в полупроводнике коэф.  $\Pi$  определяется ф-лой

$$\Pi = \frac{1}{e} (r + 2 - \epsilon_F / kT) kT. \quad (2)$$

Здесь  $r = d \ln l / d \ln \epsilon$  — параметр рассеяния,  $T$  — абс. темп-ра (см. *Рассеяние носителей заряда* в твёрдом теле);  $\epsilon_F$  отсчитывается от дна зоны проводимости.

Как видно из (2),  $e\Pi$  по абс. величине может достигать десятков  $kT$ . С увеличением концентрации электронов в вырожденном проводнике или уменьшением  $T$  величина  $\Pi$  уменьшается и при  $(\epsilon_F / kT) \geq 4$ :

$$\Pi = \frac{1}{e} \frac{\pi^2}{3} \frac{r + 1}{\epsilon_F} (kT)^2. \quad (3)$$

Коэф. Пельтье связан с коэф. термоэдс  $\alpha$  т. н. соотношением Томсона:

$$\Pi = \alpha T.$$

Это позволяет использовать для оценки  $\Pi$  результаты микроскопич. теории для  $\alpha$ . Коэф. Пельтье, являющийся важной техн. характеристикой материалов, как правило, не измеряется, а вычисляется по  $\alpha$ , измерение к-рого более просто.

$\Pi$  з. используется в термоэлектрич. холодильниках и термостатах, а также для управления процессом кристаллизации за счёт выделения или поглощения тепла на границе жидкой и твёрдой фаз при пропускании электрич. тока.

Лит.: Ансельм А. И., Введение в теорию полупроводников, 2 изд., М., 1978; Аскеров В. М., Электрические явления переноса в полупроводниках, М., 1985; Зеергер К., Физика полупроводников, пер. с англ., М., 1977; Стильбаков С. С., Физика полупроводников, М., 1987.

З. М. Даивеев,

Эффект Пельтье на контактах полупроводник  $n$ -типа — металл:  $\epsilon_F$  — уровень Ферми;  $\epsilon_c$  — дно зоны проводимости полупроводника;  $\epsilon_v$  — потолок валентной зоны.



**ПЕНЛЕВЕ УРАВНЕНИЯ** — общее название группы из шести обыкновенных дифференц. ур-ий. Введены П. Пенлеве (P. Painlevé, 1900) и Б. Гамбье (B. Gambier, 1910) при классификации ур-ий типа  $w'' = R(z, w, w')$ , где  $R$  — функция аналитическая по  $z$  и рациональная по  $w$  и  $w'$ .

Обычно П. у. записывают в след. виде:

$$I \quad w'' = 6w^2 + z,$$

$$II \quad w'' = 2w^3 + zw + a,$$

$$III \quad w'' = (w')^2 w^{-1} + (aw^3 + b) \exp rz + c + (cw^3 + d w^{-1}) \exp 2z, \quad |b| + |d| \neq 0,$$

$$IV \quad w'' = (w')^2 w^{-1} / 2 + 3w^3 / 2 + 4zw^2 + 2(z^2 - \alpha)w + \beta w^{-1},$$

$$V \quad w'' = (w')^2 \left( \frac{1}{2w} + \frac{1}{w-1} \right) - \frac{w'}{z} + \frac{(w-1)^2}{z^2} \left( \alpha w + \frac{\beta}{w} \right) + \gamma \frac{w}{z} + \delta \frac{w-1}{w-1},$$

$$VI \quad w'' = \frac{(w')^2}{2} \left( \frac{1}{w} + \frac{1}{w-1} + \frac{1}{w-2} \right) - w' \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{w-1} + \frac{1}{w-2} \right) + \frac{1}{w-z} + \frac{w(w-1)(w-2)}{z^2(w-1)^2} \left[ \alpha + \beta \frac{z}{w^2} + \gamma \frac{z-1}{(w-1)^2} + \delta \frac{z(z-1)}{(w-2)^2} \right].$$

П. у. возникают при сведениях к обыкновенным дифференц. ур-иям некр-ых нелинейных уравнений математической физики, в частности Кортвега — де Фриза уравнения (П. у. II), синус-Гордона уравнения (П. у. III), Шрёдингера уравнения нелинейного (П. у. IV).

Решения П. у. (трансцендентные ф. и к. и в П. у. Пенлеве — спец. ф-ция, не сводящиеся к известным) обладают свойством Пенлеве: не имеют др. подвижных (т. е. зависящих от постоянных интегрирования или нач. данных) особенностей, кроме полюсов. Так, решения П. у. I—IV не имеют вообще никаких особенностей, кроме полюсов; решения П. у. V имеют неподвижные логарифмы, точки ветвления при  $z = 0$  и  $z = \infty$ , а решения П. у. VI — при  $z = 0$ ,  $z = 1$  и  $z = \infty$ . Установление свойства Пенлеве позволяет находить интегрируемые варианты разл. моделей волновых явлений и мн. нелинейных ур-ий, решаемых при помощи обратной задачи рассеяния метода.

Лит.: Айнс Э. П., Обыкновенные дифференциальные уравнения, пер. с англ., Хар., 1939; Голубев В. В., Лекции по аналитической теории дифференциальных уравнений, 2 изд., М.—Л., 1950; Априоль В. И., Ильяшенко И. Ю. С., Обыкновенные дифференциальные уравнения, в кн.: Итоги науки и техники. Современные проблемы математики, т. 1, М., 1985.

Ю. А. Давыдов.

**ПЕНИНГГА РАЗРЫД** — тлеющий разряд в продольном магн. поле. Впервые исследован Ф. Пеннингом (F. Penning) в 1937. Из-за большой длины пути электронов, движущихся по спиральным траекториям вокруг силовых линий  $H$  магн. поля, значительно возрастает вероятность ионизации, что обеспечивает существование разряда при низких давлениях  $p$ , вплоть до  $10^{-8}$ — $10^{-6}$  мм рт. ст. Значение  $p_{мин}$  сильно зависит от конструкции разрядного устройства. Часто применяются коаксиальные системы, в к-рых П. р. может существовать вплоть до  $10^{-18}$  мм рт. ст. П. р. используется в нек-рых типах вакуумметров, а также в эл.-магн. сорбционных вакуумных насосах.

Лит.: Грановский В. Л., Электрический ток в газе. Установившийся ток, М., 1971.

Л. А. Сена.

**ПЕНИНГГА ЭФФЕКТ** — снижение потенциала зажигания разряда в газе, обусловленное присутствием примеси др. газа, потенциал ионизации к-рого ниже энергии возбуждения метастабильного уровня осн. газа. Объяснение этого эффекта дано Ф. Пеннингом в 1928. В отсутствие примеси электроны, ускоренные в электр. поле, отдают свою энергию атомам, переводя их в метастабильное состояние. Вследствие этого вероятность ионизации электронным ударом мала и напряжение зажигания оказывается высоким. При наличии при-

меси происходит столкновение возбужденных метастабильных атомов осн. газа с атомами примеси, в результате чего последние ионизируются за счёт энергии, освобождаясь при переходе метастабильных атомов в осн. состояние (см. Столкновение атомов). Появление такой добавки ионизации приводит к снижению эфф. потенциала ионизации среды и, следовательно, к снижению напряжения зажигания разряда  $U$ .

На рис. представлена зависимость  $U$  (в логарифмич. масштабе) от произведения давления газа  $p$  на расстояние  $d$  между электродами в чистом неоне (1), чистом аргоне (2), неоне с примесью  $5 \cdot 10^{-4}\%$  аргона (3) и неоне с примесью  $0,1\%$  аргона (4). Л. А. Сена.

**ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ** — см. Космические скорости.

**ПЕРВИЧНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ** (первичные возмущения) в ранней Вселенной — малые отклонения Вселенной от точной однородности и изотропии на радиан.-доминирующей стадии. Радиан.-доминированной (горячей) наз. стадия, когда осн. вклад в полную плотность энергии материи вносили ультрарелятивистские частицы — фотоны эл.-магн. излучения с темп-рой  $T = (2,75 \pm 0,1) \cdot (1+z)$  К (см. Микроволновое фоновое излучение), а также нейтрино и др. возможные элементарные частицы с массой покоя  $m \ll kT/c^2$  [z — красное смещение,  $1+z = R(t_0)/R(t)$ , где  $R(t)$  — масштабный фактор расширяющейся Вселенной,  $t_0$  — настоящий момент времени; на этой стадии  $R(t) \sim \sqrt{t}$ ]. В стандартной модели с Фридмана — Робертсона — Уокера метрикой Вселенная является радиан.-доминированной при  $z > 10^4$  ( $H/50^2$ )  $\kappa^{-1}$ , где  $H$  — постоянная Хаббла в км/(с·Мпк), а отношение полной плотности энергии всех ультрарелятивистских частиц к плотности энергии реликтового эл.-магн. излучения в настоящее время ( $\kappa \sim 1$ ).

Для того чтобы воссоздать очевидную сильную неоднородность Вселенной в масштабах, меньших  $10(H/50)^{-1}$  Мпк (где вещество скоценцировано в таких объектах, как галактики, звёзды, планеты и т.д.), с наблюдат. фактом эф. однородности и изотропии в больших масштабах, необходимо принять, что на радиан.-доминированной стадии эволюции Вселенной существовали малые П. ф. метрики пространства-времени с характерной безразмерной амплитудой  $10^{-4}$ — $10^{-2}$ . Галактики и др. локализов. объекты возникли из этих П. ф. вследствие гравитационной неустойчивости — роста неоднородных флуктуаций метрики пространства-времени и плотности вещества на более поздней стадии, когда осн. вклад в плотность энергии материи вносило нерелятивистское вещество (включая барьоны) с давлением  $p \ll \rho c^2$ , где  $\rho$  — плотность вещества; на этой стадии  $R(t) \sim t^{2/3}$ . Существование гравитат. неустойчивости П. ф. для адiabатических флуктуаций на стадии доминирования нерелятивистского вещества следует как из точных ур-ий релятивистской космологи, основанной на общей теории относительности, так и из нерелятивистского (ньютоновского) приближения к ним, и фактически было известно ещё И. Ньютону. Малость П. ф. в момент рекомбинации водорода при  $z \approx 10^3$  [по крайней мере, в масштабах, превышающих  $(H/50)^{-1}$  Мпк в настоящее время] подтверждается наблюдат. фактом отсутствия величинных флуктуаций темп-ры реликтового эл.-магн. излучения на уровне  $\Delta T/T \sim 10^{-4}$  в угл. масштабах от  $20'$  до  $180'$  (верх. пределы на  $\Delta T/T$  в интервале  $10^\circ$ — $180^\circ$  прибл. в 3 раза меньше).

Теоретич. исследование (Е. М. Лифшиц, 1946) показывает, что П. ф. могут быть след. типов.

А д и а б а т и ч. ф л у к т у а ц и и о п и с ы в а ю т с я возмущениями метрики Фридмана — Робертсона — Уокера скалярного типа,  $k$ -рые эффективно сводятся к неоднородному возмущению ньютоновского гравитационного потенциала и связанному с ним возмущению полной плотности энергии вещества. Кроме того, у вещества появляется потенциальная (т. н. пекулярная) скорость относительно выделенной «космологич.» системы отсчёта, в  $k$ -рой невозмущённая метрика пространственно однородна. В зависимости от характера временной эволюции адиабатич. флуктуаций принадлежит к растущей (квазизотропной) или падающей моде. Только первая мода совместима с условием малости П. ф. при  $z \approx 10^9$ . Для растущей моды П. ф. безразмерная амплитуда возмущений метрики в синхронной системе отсчёта не зависит от времени на нач. стадиях расширения Вселенной, когда пространственный масштаб флуктуаций  $L \sim R(t)$  больше размера космологич. горизонта (границы области двусторонней причинной связности, см. *Вселенная*)  $L_h \sim ct$ , каковы бы ни были свойства вещества (необходимо только выполнение *причинности принципа*). Поэтому, с точки зрения классич. теории гравитации, эта амплитуда ( $10^{-4} - 10^{-8}$ ) должна быть задана как нач. условие для Вселенной в момент её выхода из сингулярности космологической (Большого Взрыва),  $t = 0$ .

Анализ наблюдат. данных показывает, что вектор ускорения для нашей Галактики, определяемый по разнонаправленному видимому веществу (галактик в их скоплениях) вокруг неё, отклоняется менее чем на 10% от вектора скоростей Галактики относительно системы отсчёта, в  $k$ -рой плотность импульса реликтового эл.-магн. излучения равна нулю (отличие угла отклонения от нуля находится в пределах ошибок измерений). Последняя скорость определяется величиной и угл. расположением дипольной анизотропии темп-ры реликтового излучения и практически совпадает с пекулярной скоростью Галактики относительно «космологич.» системы отсчёта. Это является важным доводом в пользу того, что галактики образовывались именно из адиабатич. П. ф., для  $k$ -рых векторы пекулярной скорости и ускорения строго коллинеарны.

Векторные (вращательные) флуктуации характеризуются возмущениями метрики Фридмана — Робертсона — Уокера векторного типа (не сводимыми к градиенту от скалярной ф-ции) и вызывают пекулярную скорость вещества. При этом возмущение плотности энергии вещества равно нулю. Этот тип возмущений несовместим с малостью П. ф. на ранних стадиях эволюции Вселенной, поэтому совр. космологич. теории предсказывают отсутствие векторных П. ф. (вторичные вихревые флуктуации скорости вещества могут возникнуть из адиабатич. П. ф. при  $z \leq 10$  за счёт разл. вейлнейных эффектов).

Первичные тензорные флуктуации метрики Фридмана — Робертсона — Уокера (не сводимые к градиентам скаляров и компонент векторов) представляют собой гравитационные волны, образовавшиеся в момент Большого Взрыва. Та мода гравитацион. волн,  $k$ -рая совместима с нач. изотропией Вселенной (т. н. квазизотропная мода), характеризуется не зависящей от времени амплитудой тензоров П. ф. на стадии, когда пространственный масштаб флуктуаций  $L$  много больше размера космологич. горизонта  $L_h$ .

Существует ещё один тип П. ф. (не рассмотренный Лифшицем),  $k$ -рый возникает, когда вещество, заполняющее Вселенную, состоит из двух или неск. разл. компонент (сортов), напр. барьоны и излучение или барьоны с излучением и нейтрино. Тогда в режиме  $L \gg L_h$  существует ( $n - 1$ ) мод П. ф., где  $n$  — число разл. компонент вещества, в  $k$ -рых флуктуирует только уд. состав вещества, точнее говоря, флуктуируют полная плотность энергии вещества и метрика простран-

ства-времени малы [в отношении  $(L_h/L)^2$ ] по сравнению с флуктуациями плотности энергии отд. компонент. Для вещества, состоящего из барьонов и излучения ( $n = 2$ ), такую моду П. ф. наз. и з о т е р м и ч е с к о й, или а н и з о т р о п н о й. В более общем случае (особенно когда часть вещества составляют слабовзаимодействующие частицы, напр. нейтрино и др.) правильнее говорить об и з о э н е р г е т и ч. (и з о м е т р и ч.) П. ф. Когда в ходе расширения Вселенной условие  $L \gg L_h$  перестаёт выполняться, изоэнергетич. моды П. ф. перемешиваются с адиабатическими (исключение составляет только случай, когда компоненты имеют одинаковые ур-ния состояния). Поэтому изоэнергетич. П. ф., подобно адиабатич. П. ф., могут привести к образованию локалов. объектов и крупномасштабной структуры Вселенной.

Происхождение П. ф. По мере движения в прошлое к космологич. сингулярности ( $t = 0$ ) в изотропной космологич. модели Фридмана все флуктуации попадают в режим  $L \gg L_h$ . [В частности, все масштабы, превышающие  $50(H/50)^{-2} \cdot c/H$  Мпк в настоящее время, находившиеся в этом режиме в момент перехода от радиа.-доминирова. стадии эволюции Вселенной к стадии доминирования нерелятивистского вещества]. В этом режиме П. ф. не могут быть созданы никакими локальными физ. процессами вследствие принципа причинности. Поэтому в классич. космологии П. ф. изначально возникают в космологич. сингулярности. Математически это означает, что их величина и пространственное распределение (или спектр в фуре-представлении) должны быть произвольно заданы при  $t = 0$  в качестве нач. условий для ур-ний тяготения Эйнштейна (см. *Тяготение*). Не используя наблюдательных данных, ничего более про тип, амплитуду и спектр П. ф. сказать нельзя; иными словами, свойства П. ф. невозможно предсказать априори. В этом состоит проблема нач. условий классич. космологии.

Задача любой квантовой или полуквантовой космологии — вывести свойства П. ф. исходя из первичных принципов и ур-ний. Эта задача решается в модели *раздувающейся Вселенной*, в  $k$ -рой радиа.-доминирова. стадии Вселенной предшествует (при очень больших авенаниях кривизны пространства-времени) деситероновская стадия квазикосмопональщального расширения (см. *Де Ситтера пространство-время, Квантовая теория гравитации*). В простейшем варианте этой модели — с одним эффективным скалярным полем, ответственным за существование деситероновской стадии, — предсказывается, что П. ф. с совр. масштабом  $L \gg 1$  см принадлежат исключительно к квазизотропным адиабатич. и тензорным модам, а их амплитуда  $\delta$  слабо зависит от  $L$  ( $\log \delta / \log L \leq 1$ ; говорят, что такие П. ф. имеют плоский спектр, или спектр Зельдовича — Гартсона). В усложнённых вариантах модели с неск. скалярными полями на деситероновской стадии генерируются ещё и изоэнергетич. П. ф. (называемые в данном случае также изопфалтоными), а спектр адиабатич. П. ф. может быть более сложным.

Способы исследования П. ф. Свойства П. ф. можно, в принципе, определить из наблюдательных данных о совр. строении Вселенной. Практически наиб. важная информация об адиабатич. П. ф. с совр. масштабом  $L = (1-10^9)$  Мпк следует из вида коррелиц. ф-ции галактик и их скоплений, характеристик *крупномасштабной структуры Вселенной* (напр., распределения пустот — областей пространства, свободных от галактик, — по размеру) и из данных об угл. анизотропии темп-ры реликтового эл.-магн. излучения  $\Delta T/T$  (пока надёжно обнаружена только анизотропия дипольного типа). Гравитацион. волны, возникшие из тензоров П. ф., также дают вклад в  $\Delta T/T$  (этот эффект наиб. чувствителен к интервалу длин волн  $10^2 - 10^4$  Мпк). Наконец, гравитацион. волны с частотами, большими  $10^{-10}$  Гц, можно искать как в прямых экспериментах (наиб. перспективным здесь является использование космич. лазерных интерферо-

метров), так и путём многолетнего слежения за флуктуациями времени прихода радиоимпульсов от пульсаров в миллсекундными периодами.

Лит.: Зельдович Я. Б., Новиков И. Д., Строев И. и эволюция Вселенной, М., 1975; Мокин А. С., Полубоари и в а - К о ч и д а П. Д., Х л е б н и о в В. И., К о с т о м о в о г о н а у ч н о г о н а с л е д и я, М., 1989. А. А. С т р о б и л с к и й.

**ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ** — закон сохранения энергии для термодинамич. системы, согласно к-рому работа может совершаться только за счёт теплоты или к.-л. др. формы энергии. Поэтому работу и кол-во теплоты можно измерить в одних единицах — Джоулях (1 Дж = 0.239 кал = 0.102 кгс/м). П. н. т. сформулировано как закон природы Ю. Р. Майером (J. R. Mayer) в 1842 и установлено экспериментально Дж. Джоулем (J. Joule) в 1843. П. н. т. можно формулировать как невозможность существования вечного двигателя 1-го рода, к-рый совершал бы работу, не черпая энергию из к.-л. источника.

Согласно П. н. т., теплота  $Q$ , сообщаемая системе, равна сумме приращений внутр. энергии  $U$  и работы, производимой системой против внеш. сил:

$$Q = U_2 - U_1 + A;$$

при бесконечно малом изменении состояния системы:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1)$$

где  $\delta Q$  — бесконечно малое кол-во теплоты, передаваемой системе,  $\delta A$  — работа, совершаемая системой против внеш. сил,  $dU$  — изменение её внутр. энергии.

Ур-ние (1) является определением величины  $dU$ , т. к.  $\delta Q$  и  $\delta A$  — независимо измеряемые величины. П. н. т. утверждает, что  $dU$  есть полный дифференциал нек-рой ф-ции  $U$  (величины  $\delta Q$  и  $\delta A$ , вообще говоря, не являются полными дифференциалами). Т. о., любая термодинамич. система обладает ф-цией состояния — энергией  $U$ , зависящей лишь от параметров, определяющих равновесное состояние системы, и не зависящей от процесса, к-рым система была приведена в это состояние. Передаваемое тепло  $Q$  и работа  $A$  зависят от пути, по к-рому совершается процесс, т. к. величины  $\delta Q$  и  $\delta A$  не есть полные дифференциалы. В системах, обменивающихся со средой веществом и энергией, в П. н. т. следует учитывать энергию  $Z$ , передаваемую при переносе массы:  $Q = U_2 - U_1 + A + Z$ .

Энергию  $U$  можно экспериментально определить, измерив работу, совершаемую адиабатически замкнутой термодинамич. системой (т. е. при  $Q = 0$ ), тогда  $A_{ад} = U_2 - U_1$ , что определяет  $U$  с точностью до аддитивной постоянной. Работу  $A$  можно определять по изменениям параметров системы. Напр., при бесконечно малом расширении однородной системы (жидкости или газа) при давлении  $P$  её работа  $\delta A = PdV$  и, следовательно,  $A = \int PdV$ . Ур-ние (1) в этом случае имеет вид

$$\delta Q = dU + PdV.$$

В общем случае, если система характеризуется  $l$  экстенсивными параметрами  $a_1, \dots, a_n$  и обобщёнными силами  $X_1, \dots, X_n$ , элементарная работа

$$\delta A = \sum_{i=1}^n X_i da_i. \quad (2)$$

П. н. т. можно формулировать также с помощью эн-талпии  $H = U + PV$ , т. к.

$$\delta Q = dH - VdP.$$

Такая форма удобна для применения П. н. т. к стационарным процессам (см. Джоуль — Томсона эффект).

П. н. т. имеет многочисленные приложения, особенно офитивные при использовании также и второго начала термодинамики. Следствием П. н. т. является формула Майера для разности между тепловкостью при постоянном давлении и при постоянном объёме:

$$C_p - C_v = [P + (\partial U/\partial V)_T](\partial V/\partial T)_p,$$

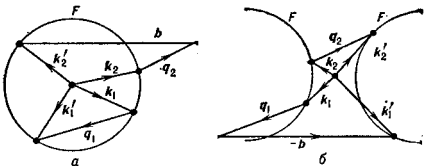
эта величина означает кол-во тепл. переданное в работу.

В феноменологич. термодинамике внутр. энергию  $U = \bar{U}(V, T)$  рассматривают как экспериментально измеряемую ф-цию (кало-ри-че-ское уравнение в состоянии). Статистич. физика позволяет теоретически рассчитать ур-ние состояния исходя из законов взаимодействия между молекулами и вывести соотношение (2). При этом одновременно получается статистич. обоснование как П. н. т., так и 2-го начала термодинамики.

Лит.: Ван-дер-Ваальс И. Д., Констант Ф., Курс термодинамики, пер. с нем., т. 1, М., 1936; Энштейн Л. П. С., Курс термодинамики, пер. с англ., М., 1948; З о м е р ф е л д А., Термодинамика и статистическая физика, пер. с нем., М., 1955; К у б о Р., Термодинамика, пер. с англ., М., 1970; Л е о н т о в и ч М. А., Введение в термодинамику. Статистическая физика, М., 1983; Н о в и к о в И. И., Термодинамика, М., 1984.

**ПЕРЕБОСА ПРОЦЕССЫ** ( $U$ -процессы, от нем. Umklapp — переброс) — акты рассеяния квазичастиц, в частности электронов проводимости и дырок, при к-рых полный квазиимпульс (измеренный в единицах  $\hbar$ ) всех квазичастиц после рассеяния отличается от полного квазиимпульса до рассеяния на вектор  $b$  обратной решётки. Причиной несохранения квазиимпульса является периодич. потенциал в кристалле, на фоне к-рого «разыгрывается» рассеяние. Акты рассеяния, в к-рых полный квазиимпульс сохраняется, наз. нормальными ( $N$ -процессы).

Разбиение всех актов рассеяния на  $U$ - и  $N$ -процессы зависит от того, как выбрана элементарная ячейка импульсного пространства. Рис. иллюстрирует рас-



сеяние электрона вблизи поверхности Ферми  $F$  при поглощении фонона. Если в качестве элементарной ячейки выбрана первая Бриллюэна зона (рис. а), то при переходе электрона из состояния с импульсом  $k_1$  в состояние с импульсом  $k_1'$  с поглощением фонона с квазиимпульсом  $q_1$  полный нач. квазиимпульс  $k_1 + q_1$  лежит внутри этой зоны, и поэтому он равен конечному  $k_1' = k_1 + q_1$ . Т. о.,  $k_1 \rightarrow k_1'$  есть  $N$ -процесс. При переходе  $k_2 \rightarrow k_2'$  с поглощением фонона с импульсом  $q_2$  вектор  $k_2 + q_2$  лежит вне зоны Бриллюэна, и поэтому  $k_2 = (k_2 + q_2) + b$ , т. е.  $U$ -процесс. На рис. (б) элементарная ячейка пространства получена из зоны Бриллюэна сдвигом на  $-b/2$ . При этом  $k_2 \rightarrow k_2'$  является  $U$ -процессом, а  $k_1 \rightarrow k_1'$  —  $N$ -процессом. Хотя относительно каждого конкретного акта рассеяния нельзя сказать, нормальный он или с перебросом, но при любом выборе элементарной ячейки существуют процессы обоих типов.

Наличие П. п. означает, что при рассеянии квазичастиц происходит не только обмен квазиимпульсом между ними (напр., внутри электронно-фононовой системы), но и передача импульса кристаллу как целому, т. е. тем его степеням свободы, к-рые ответственны за движение «жёсткого» кристалла. По этой причине П. п. приводят к диссипации импульса системы квазичастиц и могут быть причиной тепло- и электросопротивления (в отличие от  $N$ -процессов; см. Межэлектронное рассеяние). Результат вычисления таких макроскопич. характеристик не зависит от выбора элементарной ячей-



ки, т. е. от способа разделения всех процессов на  $N$  и  $U$ -процессы.

Лит.: Займа и Дж. Электронны и фононы, пер. с англ., М., 1962; Гантмахер В. Ф., Левинсон И. Б., Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках, М., 1984, И. Б. Левинсон.

**ПЕРЕВАЛА МЕТОД** — способ оценки интегралов, подынтегральные ф-ции к-рых имеют резкий максимум. Обычно П. м. применяют для оценки интегралов вида

$$I(\lambda) = \int_{\gamma} dz f(z) \exp[\lambda q(z)],$$

где  $\lambda$  — большой параметр,  $\lambda \rightarrow \infty$ ,  $\gamma$  — контур в комплексной плоскости  $z$ , ф-ции  $f(z)$  и  $q(z)$  аналитичны в области, содержащей  $\gamma$ . П. м. позволяет получить асимптотическое разложение интеграла  $I(\lambda)$ . Суть П. м. заключается в том, что для подынтегральной ф-ции с резким максимумом осн. вклад в интеграл даёт малая окрестность точки максимума  $z_0$ . Преобразовав путь интегрирования и производя замену переменных, добиваются того, чтобы набл. вклад в интеграл давала окрестность  $z_0$  как можно меньшего размера, а подынтегральная ф-ция имела набл. простой вид. Получающиеся эталонные интегралы часто удаётся вычислить. Простейший вариант П. м. был использован П. Лапласом (P. Laplace) в 1820, затем он был развит в работах Б. Римана (B. Riemann) в 1863 и П. Дебая (P. Debye) в 1909.

На первом этапе вычислений контур  $\gamma$  деформируют в контур с теми же концами, проходящий через стационарные точки  $z_0$  ф-ции  $q(z)$  [точка, в к-рых  $q'(z)=0$ ]. Стационарная точка является седловой точкой поверхности  $u = u(x, y) = \text{Re}q(z)$ ,  $z = x + iy$ . Набл. удобный путь интегрирования совпадает с линией, вдоль к-рой  $\text{Im} q(z)$  постоянна, а  $\text{Re}q(z)$  убывает быстрее всего (перевальный контур, путь наименьшего спуска), тогда вычисление интеграла сводится к интегрированию по вещественной переменной. Др. возможность — выбор линии с постоянной  $\text{Re}q(z)$ , в этом случае П. м. переходит в метод стационарной фазы. Если при переходе к перевальному контуру встречаются особые точки ф-ции  $f(z)$ , соответствующие вклады учитывают с помощью *леммы теоремы*. Если в рассматриваемой области  $q'(z)$  не имеет нулей, осн. вклад в интеграл даёт окрестность одного из концов контура интегрирования.

На след. этапе вычислений производят замену переменной  $\tau(z) = q(z)$  так, чтобы максимум ф-ции  $\tau$  достигался при  $s = 0$ , а производная  $\tau'(s)$  обладала нулями такого же порядка, как и ф-ция  $q(z)$ . От выбора  $\tau(z)$  зависит вид эталонного интеграла.

1. Если  $q'(z)$  имеет в точке  $z_0$  нуль порядка  $n$ , а  $f(z)$  регулярна вблизи  $z_0$ , то  $\tau(s) = q(z_0) + s^{n+1}$ . Эталонный интеграл выражается через гамма-функцию (см. *Эталонные интегралы*).

2. Если  $q'(z)$  имеет два близко расположенных простых нуля  $z_{1,2}$ , то  $\tau(s) = a_0 + \sigma s - s^3/3$ ,  $\sigma \rightarrow 0$ ,  $a_0$  — постоянная. Эталонный интеграл выражается через *Эйри функции*. Если  $\sigma$  конечна, то надо учитывать вклады каждого нуля отдельно (случай 1).

3. Три равноотстоящих нуля, расположенных близко друг к другу. Подстановка  $\tau(s) = a_0 - (a + s^2)^3$ , эталонный интеграл выражается через *параболического цилиндра функции*.

4. Если вблизи  $z_0$  имеется полюс ф-ции  $f(z)$ , то интеграл разбивается на две части, одна из к-рых соответствует случаю 1, а вторая выражается через интеграл вероятности или *Френеля интеграл* (см. *Интегральные функции*).

5. Если  $f(z)$  имеет точку ветвления 1-го порядка вблизи простой седловой точки, то интеграл выражается через ф-цию парабол. цилиндра.

6. Седловая точка находится вблизи концевой точки контура интегрирования, но не совпадает с ней. Эталонный интеграл выражается через интеграл Френеля.

Напр., если ф-ция  $f(z)$  не имеет особенностей вблизи нулей седловой точки 1-го порядка  $z_0$ , т. е. точки, в к-рой  $q'(z_0) = 0$ ,  $q''(z_0) \neq 0$ , то асимптотич. значение  $I(\lambda)$  таково:

$$I(\lambda) \sim [-2\pi/\lambda q''(z_0)]^{1/2} f(z_0) e^{\lambda q(z_0)}, \quad \lambda \rightarrow \infty,$$

аналогично получают асимптотич. разложение интеграла  $I(\lambda)$  по стенаниям  $\lambda^{-1}$ .

П. м. можно применять и в многомерном случае. Напр., для кратного вещественного интеграла

$$I_n(\lambda) = \int \dots \int dx_1 \dots dx_n f(x) \exp[-\lambda q(x)],$$

имеющего простую стационарную точку  $x_0 = (x_{10}, \dots, x_{n0})$ , и для ф-ции  $f(x)$ , регулярной вблизи  $x_0$ , асимптотич. оценка имеет вид

$$I_n(\lambda) \sim [f(x_0) e^{-\lambda q(x_0)} (2\pi/\lambda)^{n/2}] \det(\partial^2 q/\partial x_i \partial x_j) |_{x=x_0}^{-1/2}.$$

Возможность перехода к эталонному интегралу в случае многомерной перевальной точки определяется леммой И. Морса, в соответствии с к-рой в окрестности невырожденной перевальной точки существует такая система локальных координат  $x_1, \dots, x_n$ , что  $f(x) = f(0) + x_1^2 + \dots + x_n^2$ . В тех случаях, когда при замене переменных возникают особенности, структуру эталонных интегралов определяют методами теории дифференцируемых отображений (см. *Катастроф теория*).

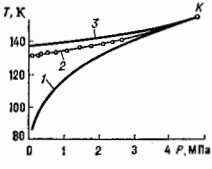
П. м. зачастую является единств. средством оценки интегралов, его применяют в разл. задачах матем. и статистической физики, распространения и рассеяния волн, диффузии и теплопроводности, при исследовании *специальных функций, интегральных преобразований* и др.

Лит.: П. м. в ф-рис Г. Сивиле Б. Методы математической физики, пер. с англ., в. 3, М., 1970, гл. 17; Фелдман Ю. К. В. М., Метод перевала, М., 1977; Фелдман Я. И., Маркувич и др. Н., Излучение и рассеяние волн, пер. с англ., т. 1, М., 1978, гл. 4; О д л в р Ф., Введение в асимптотические методы и специальные функции, пер. с англ., М., 1978, в. В. Рохман.

**ПЕРЕГРЕВ** — 1) нагрев пара выше температуры насыщения  $T_{нас}$  при заданном давлении. С увеличением  $P$ ,  $(T - T_{нас})$  пар становится всё более перенасыщенным. Перегретый водяной пар широко применяется в теплотехнике, в частности на тепловых электростанциях.

2) Нагрев конденсиров. фазы до темп-ры, превышающей темп-ру равновесия с др. фазой, так что исходная фаза оказывается в *метастабильном состоянии*. Предельный П. соответствует с п и о д а л и — границе термодинамич. устойчивости однородной системы [условие  $(\partial P/\partial T)_{\mu} = 0$ ]. Жидкости удаётся перегреть значительно выше темп-ры равновесия с паром  $T_{нас}$ . П. можно достичь не только повышением  $T$ , но и уменьшением внеш. давления  $P$  ниже  $P_{нас}(T)$ . Существование П. жидкости обеспечивает конечную скорость *парообразования*. Однако парообразование затруднено, если нет открытой поверхности и паровоздушных пузырьков в объёме и на стенках. Гомогенное (флуктуац.) появление зародышей с заметной частотой происходит только при достаточно большом П.  $(T - T_{нас})$  или  $(P_{нас} - P)$ . На рис. кружками отмечены эксперим. значения  $T$  для гомогенного вскипания аргона при изобарич. нагреве в стеклянной трубке: 1 — линия насыщения,  $K$  — критическая точка, линия 2 соответствует ожидаемому П. по теории гомогенного зарождения для условий опыта, 3 — спинодаль.

Метастабильным состоянием отвечает П. низкотемпературной фазы при полиморфных превращениях. П. можно наблюдать при переходе сверхпроводник — нормальный металл в магн. поле.



Лит.: Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е., Техническая термодинамика, 4 изд., М., 1963; Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии, М., 1969. В. П. Крылов.

**ПЕРЕДАЮЩИЕ ЛИНИИ** — см. *Линии передачи*.  
**ПЕРЕДАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ** — группа электронно-лучевых приборов, предназначенных для преобразования изображений движущихся и неподвижных объектов в световых, ИК-, рентг. и др. лучах в последовательность электрич. сигналов на передающей конце телевиз. систем (вещательных, промышленных, медицинских, дефектоскопических и др.). Специфич. элемент П. э.-л. т. является двумерный фотозувствит. слой, на к-рый проецируется передаваемое изображение. В зависимости от вида используемого фотозувствит. явления различают слои, обладающие способностью пускать электроны под воздействием эл.-магн. излучения (см. *Фотоэффект внешнй*), называемые фотокатодами, и слои, в к-рых излучение приводит к изменению их сопротивления (см. *Фотоэффект внутрнй*, *Фотопроводимость*).

Из П. э.-л. т. с внеш. фотоэффектом применяются суперрториконы и диссекторы. В суперрториконе (рис. 1) электроны, эмитируемые фотокатодом 1, ускоряются элетрич. полем и фокусируются магн. полем

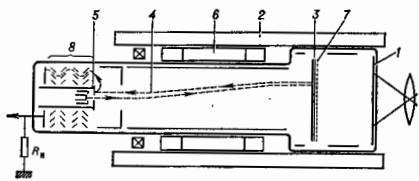


Рис. 1.

длинной фокусирующей катушки 2 на тонкой двусторонней мишени 3 из полупроводящего стекла так, что вышедшие с одной точки фотокатода электроны приходят в одну точку мишени и, выбывая из неё вторичные электроны, заряжают её положительно (см. *Вторичная электронная эмиссия*). Др. сторона мишени периодически посточно сканируется пучком 4 медленных электронов, к-рый формируется электронной пушкой 5, фокусируется той же катушкой 2 и отклоняется поперечным магн. полем двух пар отклоняющих катушек 6. Появляющиеся на мишени за счёт вторичной эмиссии под воздействием электронов с фотокатода заряды в промежуток времени между двумя проходами пучка 4 накапливаются на ёмкости между обращённой к фотокатоду створной мишени и мелкоструктурной сеткой 7, что приводит к локальному повышению потенциала обеих сторон мишени, пропорциональному освещённости соответствующих участков фотокатода. При сканировании мишени пучком потенциал мишени понижается, а часть электронов пучка, тем большая, чем меньше накопленный заряд, отражается от неё и направляется на электронный умножитель 8, с нагрузки к-рого  $R_n$  снимается усиленный сигнал. Остающаяся при этом между обеими створными мишени разность потенциалов устраняется за время передачи одного кадра изображения после прохода пучка за счёт конечной проводимости материала мишени. Суперрториконы являются наиб. чувствительными к свету П. э.-л. т., работоспособны в разных модификациях при освещённости на фотокатод от  $10^{-4}$  до  $10^{-4}$  лкс и применяются поэтому в спец. областях телевиз. техники в условиях низкой освещённости.

В диссекторе (рис. 2) поэлементная генерация сигнала производится без помощи электронного пучка путём отклонения в двух взаимно перпендикулярных направлениях магн. катушками 1 всего электронного потока с фотокатода 2. Поток фокусируется катушкой 3

или эл.-статич. электронными линзами в плоскости диафрагмы 4. Ток, проходящий через отверстие диафрагмы от соответствующего элемента фотокатода в процессе отклонения, усиленный электронным умножителем 5, представляет собой ив децибитал, выделяемый на нагрузку  $R_n$ . Поскольку в диссекторах не используется эффект накопления зарядов их чувствительность к свету недостаточна для работы в нормальных телевиз. режимах с передачей 25 кадров/с, но позволяет реализовать передачу в специальных малоплужущих закопосных телевиз. системах с малой частотой передачи кадров, в к-рых др. виды П. э.-л. т. неприменимы.

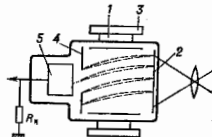


Рис. 2.

В вещательном чёрно-белом и цветном телевидении и нек-рых спец. областях, где ранее применялись суперрториконы, монополюсное положение заняли П. э.-л. т. с внутр. фотоэффектом на основе фотопроводимости (см. *Видеоан.*).

Лит.: Гершберг А. Е., Передающие телевизионные трубки с внутренним фотоэффектом, 2 изд., Л., 1973; Жигарев А. А., Шамалева Г. П., Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы, М., 1982. В. Л. Герье.

**ПЕРЕЗАРЯДКА ИОНОВ** — элементарный процесс взаимодействия положительного иона с нейтральным атомом (молекулой) газа, при к-ром один из электронов нейтральной частицы переходит к иону. П. и. происходит по схеме:  $A^+ + B^0 \rightarrow A^0 + B^+$  (верх. индексы указывают заряд частицы). Если при П. и. внутр. энергия системы взаимодействующих частиц не меняется, то перезарядка наз. резонансной. Обмен электроном между атомарным ионом и атомом того же элемента (или между молекулярными ионом и молекулой того же вещества) — пример такой симметричной резонансной перезарядки.

Вероятность П. и. определяется эфф. сечением перезарядки  $\sigma$ , к-рое зависит от рода сталкивающихся частиц, их относит. скорости  $v$  и т. н. параметра Мессе  $\xi = a\Delta\epsilon/hv$  ( $a$  — расстояние порядка атомных размеров,  $\Delta\epsilon$  — изменение внутр. энергии). В случае симметричной резонансной П. и. параметр Мессе равен 0, т. е.  $\Delta\epsilon=0$ , и сечение перезарядки  $\sigma$  монотонно растёт с уменьшением скорости столкновения и при тепловых энергиях может значительно превышать газокинетич. сечение.

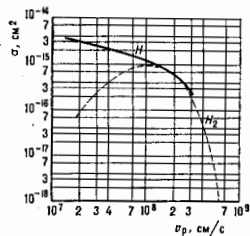
Для нерезонансной перезарядки в зависимости  $\sigma(v)$  имеется максимум при  $\xi \sim 1$ ; при больших скоростях столкновения ( $\xi \ll 1$ ) поведение  $\sigma(v)$  такое же, как для симметричной резонансной перезарядки, а при малых скоростях столкновения ( $\xi \gg 1$ ) сечение экспоненциально падает с уменьшением  $v$ .

Типичным примером П. и. может быть перезарядка протонов на атомах (симметричная резонансная П. и.) и молекулах (нерезонансная П. и.) водорода (рис.).

Возможна также резонансная П. и. с образованием возбуждённого атома, когда электрон захватывается на один из свободных верхних энергетич. уровней.

В электропритоных газохозможна П. и., при

Эффективные сечения перезарядки ионов в атомарном и молекулярном водороде.



к-рой положит. ион захватывает два электрона, превращаясь в отриц. ион. П. и. возможна вблизи поверхности металла. При этом ион нейтрализуется электроном металла.

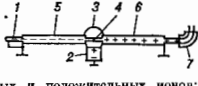
П. и. играет существенную роль в балансе частиц высокотемпературной плазмы; определяет торможение пучка атомов, импегированных в плазму того же элемента, подвижность ионов в собств. газе, свойства газоразрядной плазмы, созданной в атомном газе, и т. д.

Лит.: Мотт Н., Мессеи Н., Теория атомных столкновений, пер. с англ., 3 изд., М., 1969; Никитин В. Е., Смирнов В. Б., Медленные атомные столкновения, М., 1990.

В. М. Смирнов

**ПЕРЕЗАРЯДНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ** (таандем) — высоковольтный ускоритель, в к-ром благодаря перезарядке ускоряемых частиц (изменению знака, а иногда и величины заряда) одно и то же ускоряющее напряжение применяется дважды: отрицат. ионы ускоряются при движении к положительно заряженному высоковольтному электроду, а положит. ионы, образовавшиеся после перезарядки, — при движении от него к электроду с

Схема перезарядного ускорителя: 1 — источник отрицательных ионов; 2 — высоковольтный генератор; 3 — высоковольтный электрод; 4 — перезарядная мишень; 5, 6 — пучки отрицательных и положительных ионов; 7 — сепаратор.



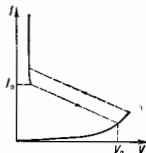
нулевым потенциалом. Использование перезарядки позволяет при том же напряжении генератора увеличить энергию протонов вдвое, а энергию более тяжелых частиц в неск. раз. При этом облегчаются питание и обслуживание ионного источника, к-рый находится под нулевым потенциалом. Образующиеся после перезарядки частицы с разл. зарядами ускоряются до разных энергий, поэтому для их разделения после ускорения необходима сепарация, осуществляемая магнитом с полем, перпендикулярным направлению движения частиц. Энергия частиц на выходе П. у. равна  $\mathcal{E} = eU(n_+ + n_-)$ , где  $U$  — напряжение высоковольтного генератора,  $n_+$  и  $n_-$  — заряды частиц до и после перезарядки (обычно  $n_+ = 1$ ). Добавление ещё одного генератора с отрицат. полярностью напряжения (д в и о й т а н д е м) повышает энергию частиц до  $\mathcal{E} = eU(2n_+ + n_-)$ . Типичные величины напряжений, применяемые в П. у., ~10—20 МВ, в набр. крупных П. у. — 25—30 МВ.

Идея использовать перезарядку для увеличения энергии ускоряемых частиц предложена У. Ч. Беннеттом (W. H. Bennett) в 1935, однако она была реализована лишь в 1958 после разработки эфф. источников отрицат. ионов и перезарядных устройств — мишеней. Перезарядная мишень представляет собой трубку, в к-рую подается газ, или пеленку твердого вещества (углерода) толщиной неск. мкг/см<sup>2</sup>. Прямое твердых мишеней позволяет получить положит. ионы тяжелых элементов с более высокой зарядностью ( $n_+ = 7-10$ ). Для дополнит. обдирки ионов после перезарядки на одном из участков ускорит. тракта может быть установлена ещё одна мишень.

Лит.: Комар Е. Г., Основы ускорительной техники, М., 1975; «Nuclear Instruments and Methods», 1974, в. 122, № 1/2 (спец. выпуск). М. П. Сельвин.

**ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЭФФЕКТЫ** — скачкообразный обратимый переход полупроводника (или полупроводниковой структуры) из высокоомного состояния в низкоомное под действием элктрич. поля, превышающего пороговое значение  $E_{пк} = 10^4-10^6$  В/см. П. э. наблюдается в полупроводниках, у к-рых вольт-амперная характеристика (ВАХ) имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Такой характер ВАХ обусловлен формированием элктрич. доменов (для ВАХ N-типа; см. Ганна эффект, Ганна диод) или токовых шнуров (для ВАХ S-типа; см. Шнуровые токи).

Термин «переклечение» возник в связи с обнаружением быстрого ( $10^{-11}$  с) и большого (4-го порядка) изменения проводимости халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) сложного состава (рис.). П. э. в ХСП впервые наблюдался в 1961—62 А. Д. Пирсоном (А. D. Pearson), Б. Т. Но-



Вольт-амперная характеристика халькогенидных стеклообразных полупроводников: I — сила тока; V — напряжение.

ломийцем, С. Р. Овшинским (патент США, 1963). В патентной литературе П. э. в ХСП наз. э ф ф е к т о м О в ш и н с к о г о (см. Аморфные и стеклообразные полупроводники).

В плёнках ХСП с двумя металлич. электродами П. э. наблюдается при постоянном, переменном и импульсном напряжении. Пороговые ток  $I_{п}$  и напряжение  $V_{п}$  не зависят от полярности напряжения, а также от темп-ры  $T$  в диапазоне 2—250 К; при повышении  $T$  они претерпевают скачок:  $I_{п}$  возрастает, напряжение падает и затем слабо изменяется с  $T$ , вплоть до размягчения материала. Аваналогично зависит  $I_{п}$  и  $V_{п}$  от длительности импульса напряжения  $V$ , и скачок параметров наблюдается при длительности импульсов, близкой ко времени диэлектрич. релаксации материала. В зависимости от амплитуды импульсов переклечение может возникать как на переднем фронте импульса (длительность 50 пс), так и с задержкой. В последнем случае в образце формируется канал, в к-ром пороговые условия реализуются раньше, чем в остальной части образца. Трансформация канала в токовый шнур происходит скачком, когда канал теряет флуктуат. устойчивость (см. Флуктуация электрические), а плотность тока в канале достигает критич. величины. Если плотность тока в канале не достигает критич. величины, преобразование канала в шнур происходит плавно (П. э. «вырождается»).

Дифференц. сопротивление образца с токовым шнуром близко к 0. Плотность тока в шнуре «насыщается» при величине порядка  $\sim 10^4$  А/см<sup>2</sup>. Сечение шнура практически линейно зависит от тока. Время восстановления пороговых параметров после сжатия напряжения определяется восстановлением однородности образца и является линейной ф-цией расстояния между электродами. Для образцов длиной  $\sim 0,5$  мкм и сечением  $10^{-10}$  см<sup>2</sup> это время сравнимо со временем переклечения. Энергия, затрачиваемая на переклечение таких образцов, может достигать 10—15 Дж при  $T = 300$  К. Уменьшение  $V_{п}$  в течение первых переклечений обусловлено несовершенством стеклообразных плёнок и контактов.

В кристаллич. полупроводниках с S-образной ВАХ (при одинаковых с ХСП параметрах) П. э. отсутствует. Поэтому механизмы П. э. в ХСП связывают с влиянием разупорядоченности. Однозначно механизм П. э. в ХСП не установлен.

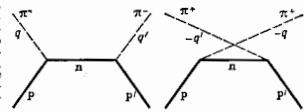
Практически неограниченное число переклечений ( $>10^{14}$ ) и стойкость ко всем видам внеш. воздействий, а также возможность управления фазовыми трансформациями в токовом шнуре (кристаллизация) обеспечивают использование П. э. в стабилизаторах напряжения, для защиты интегральных схем от перенапряжения, в переклочателях СВЧ-сигналов, в датчиках давления и темп-ры, генераторах сигналов спец. формы, операц. усилителях и т. п.

Лит.: Костылев С. А., Шкут В. А., Электронное переклечение в аморфных полупроводниках, К., 1978; A d e r D., H e n r i c h H. K., M o t t N., The mechanism of threshold switching in amorphous alloys, «Rev. Mod. Phys.», 1978, т. 50, в. 208; M a d a n A., S h a w M. P., The physics and applications of amorphous semiconductors, Boston—[a. o.], 1988.

В. Б. Сандомирский

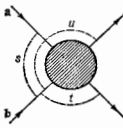
**ПЕРЕКРЕСТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ** в коносфере — то же, что *Люксембург — Горьковский эффект*.  
**ПЕРЕКРЕСТНАЯ СИММЕТРИЯ** (кроссинг-симметрия) — особый вид симметрии в квантовой теории поля, состоящий в том, что амплитуда любого процесса не изменяется, если к-л. частицы из начального и конечного состояний поменять местами, заменив при этом частицы на *античастицы*. Была открыта в теории воуэмунд и на примере низшего порядка  $\lambda N$ -рассеяния изображена на рис. 1. Пример иллюстрирует отличие

Рис. 1. Диаграммы Фейнмана перекрестных процессов уругного  $\lambda r$ - и  $\lambda r'$ -рассеяния;  $q, q'$  ( $-q, -q'$ ) — начальные и конечные 4-импульсы  $\lambda$  ( $\lambda'$ )-мезона.



П. с. от СРТ-инвариантности (см. *Теорема СРТ*): нуклоны не затрагиваются П. с. В общем случае П. с. следует из редуцированных Ф-л и доказана в *аксиоматической квантовой теории поля*.

Наиб. интересные выводы из П. с. следуют для бинарного процесса  $a + b \rightarrow c + d$ . Обозначим через  $s = (p_a + p_b)^2$  квадрат его полной энергии в системе центра инерции ( $p_i$  — 4-импульс частицы  $i$ ). Применяя П. с. к двум парам частиц (a, c) и (a, d), получим ещё два процесса, для к-рых роль  $s$  выполняет соответственно переменные  $u = (p_b - p_c)^2$  и  $t = (p_b - p_d)^2$  (рис. 2). Величины (s, u, t) называются *манделштамовскими переменными* и соответствуют им три процесса — a, u- и t-каналы. П. с. утверждает, что амплитуды трёх процессов



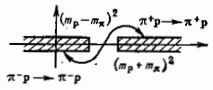
- I.  $a + b \rightarrow c + d$  (s, u, t),
- II.  $\bar{c} + b \rightarrow \bar{a} + d$  (u, s, t),
- III.  $\bar{d} + b \rightarrow c + \bar{a}$  (t, u, s)

равны при указанных заменах манделштамовских переменных. Замена переменных следует понимать не формально, а как *аналитическое продолжение*, напр. по переменной  $s$  для процесса I. При аналитич. продолжении точка (s, u, t) из физ. области реакции I переходит в нефиз. область реакции II, что легко усматривается из вида замены (a, c) в импульсном пространстве:

$$(p_a, p_b, p_c, p_d) \rightarrow (-p_c, p_b, -p_a, p_d).$$

Возможность такого аналитич. продолжения была впервые доказана Н. Н. Боголюбовым при установлении дисперсионных соотношений (см. *Дисперсионные соотношения метод*) для  $\lambda N$ -рассеяния при фиксиров. значении переданного импульса. На основе спец. аксиоматики, в к-рой ключевую роль играет принцип *микрорепрезентации* Боголюбова, было доказано существование единой аналитич. ф-ции комплексного переменного  $s$ , граничные значения к-рой представляют собой амплитуды перекрестных процессов. Область аналитичности и соответствие граничных значений амплитудам даны на рис. 3. Распространением представления о единой аналитич. ф-ции на амплитуды, зависящие от неск. комплексных переменных, является *Мандельстама представление*, к-рое ещё не доказано. Трудности доказа-

Рис. 3. Комплексная  $s$ -плоскость с разрезами, соответствующими перекрестным процессам (второй берег правого разреза соответствует физической области процесса  $\lambda r \rightarrow \lambda r$ , левый берег левого разреза — физической области перекрестного процесса  $\lambda r \rightarrow \lambda r'$ ;  $m_p, m_\pi$  — массы протона и  $\pi$ -мезона).



тельства аналитич. свойств и конструктивного построения удовлетворяющих им амплитуд предшествуют прямой эксперим. проверке П. с. Наиб. эффективно она была использована при проверке дисперсионных соотношений в физике частиц. С её помощью по данным об эл.-магн. структуре протона предсказано существование  $r$ -мезона — резонансного состояния в системе двух пионов. П. с. активно применяется при изучении асимптотич. свойств амплитуд процессов, в *Редже полюсов методе*. Наиб. интересное использование она нашла в физике низких энергий. Вместе с *унитарности условием* и предположением о важности малого числа парциальных волн она позволила получить замкнутые системы ур-ний.

Лит.: Ширков Д. В., Серебряков В. В., Мещеряков В. А., Дисперсионная теория сильных взаимодействий при низких энергиях, М., 1967; Бартоу Т., Дисперсионные методы в теории поля, пер. с англ., М., 1968; Ичиносэ И. К., Зюбер Ж.-Б., Квантовая теория поля, пер. с англ., т. 1, М., 1984, гл. 2. В. А. Мещеряков.

**ПЕРЕКРЕСТНЫЕ ПРОЦЕССЫ** — неравновесные термодинамич. процессы переноса, в к-рых потоки  $J_i, J_k$  вызваны термодинамич. силами  $X_k, X_i$  соответственно, при  $i \neq k$ . В линейных соотношениях между термодинамич. силами и потоками (см. *Термодинамика неравновесных процессов*):

$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k.$$

П. п. соответствуют феноменологич. или *кинетические коэффициенты*  $L_{ik}$  и  $L_{ki}$ . Согласно *Онсагера теореме*,  $L_{ik} = L_{ki}$  (в отсутствие магн. поля и вращения системы как целого).

Примеры П. п. в непрерывной системе (гомогенной смеси жидкостей или газов) — *термодиффузия*, в к-рой поток вещества вызван градиентом темп-ры, и *Дюфура эффект*, в к-ром поток тепла вызван градиентом концентрации (или хим. потенциалом). Термодиффузия и эффект Дюфура представляют собой в а т а г о у щ и е с я процессы по отношению к диффузии и теплопроводности, к-рые являются п р я м ы м и процессами.

П. п. имеют место также в прерывных системах, напр. в процессах переноса между резервуарами, соединёнными капилляром, пористой стенкой или проицаемой мембраной. В однокомпонентной прерывной системе объёмный поток вещества  $J$ , сила элктрич. тока  $I$  и поток тепла  $Q$  пропорциональны термодинамич. силам — разности давлений  $\Delta P$ , разности элктрич. потенциалов  $\Delta \phi$  и отнosit. разности темп-р  $\Delta T/T$ :

$$\begin{aligned} J &= a_{11} \Delta P + a_{12} \Delta \phi + a_{13} \Delta T/T, \\ I &= a_{21} \Delta P + a_{22} \Delta \phi + a_{23} \Delta T/T, \\ Q &= a_{31} \Delta P + a_{32} \Delta \phi + a_{33} \Delta T/T, \end{aligned}$$

где  $a_{12} = a_{21}, a_{13} = a_{31}, a_{23} = a_{32}$ . Среди процессов переноса, в к-рых отлична от нуля лишь одна термодинамич. сила, П. п. являются э л е к т р о к и н е т и ч е с к и е процессы

$$\begin{aligned} J &= a_{12} \Delta \phi - \text{потокопроводность}, \\ I &= a_{21} \Delta P - \text{электроосмос}; \end{aligned}$$

термоосмотические, или термомеханические, процессы

$$\begin{aligned} J &= a_{13} \Delta T/T - \text{термоосмос}, \\ Q &= a_{31} \Delta P - \text{осмотический термоэффект}; \end{aligned}$$

термоэлектрические процессы

$$I = a_{23} \Delta T/T, \quad Q = a_{32} \Delta \phi.$$

Кинетич. коэф. П. п.  $a_{jk}$  могут быть как положительными, так и отрицательными, в зависимости от отнosit. роли сил притяжения или отталкивания во взаимодействии между молекулами, но они всегда удовлетворяют неравенствам

$$a_{11} a_{22} - a_{12}^2 > 0, \quad a_{11} a_{33} - a_{13}^2 > 0,$$

$$a_{22}a_{33} - a_{11}^2 > 0, \quad a_{11} > 0, \quad a_{22} > 0, \quad a_{33} > 0,$$

$$\begin{vmatrix} a_{11}a_{12}a_{13} \\ a_{21}a_{22}a_{23} \\ a_{31}a_{32}a_{33} \end{vmatrix} > 0,$$

к-рые следуют из положительности производств *энтропии*. В многокомпонентных системах возможно значительно большее число П. т. к. при этом в качестве термодинамич. свл нужно учитывать конечные разности концентраций компонентов или их хим. потенциалов.

Лит.: Гроот С. де, Маазу П., Неравновесная термодинамика, пер. с англ., М., 1964, т. 11, 15; Хазане Е. Термодинамика необратимых процессов, пер. с нем., 1967, гл. 3.

**ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ** — уменьшение намагниченности *M* образцов магнитоупорядоченных веществ и изменение направления *M* на обратное, вызванные уменьшением и последующим изменением на обратное веш. магн. поля *H*, под действием к-рого образец был предварительно намагнитен.

В многодоменных ферро-, ферри-, а также слабых ферромагнетиках процесс П. начинается с образования а р о д ы ш е й П. (при достижении  $H = H_c$  — поля зародышеобразования). Зародыши (области с обратной намагниченностью) могут возникать путём локальных необратимых поворотов *M* в местах с пониженным полем анизотропии, с поводом. плотностью магнитостатич. зарядов и в др. местах локальной магн. неоднородности. В качестве зародышей П. могут выступать также остатки магнитной доменной структуры (МДС) вблизи поверхности практически намагниченных кристаллов. При достижении  $H = H_c$  (поля старта) зародыши П. начинают расти. Как правило, изменение *M* (рост зародышей) отстаёт от изменения поля *H*, что связано с общими причинами появления гистерезиса магнитного.

Разрастаясь и сливаясь при уменьшении *H*, зародыши П. образуют развитую МДС. Далее П. идёт путём перераспределения объёмов магнитных фаз (МФ) с разл. ориентацией *M* за счёт смещения доменных стенок (ДС). На этом этапе важное значение в П. имеют процессы задержки ДС на дефектах. Поле *H<sub>0</sub>*, при к-ром преобладают такие задержки, наз. критич. полем.

Если ДС образовалась при  $H > 0$ , то вплоть до  $H = 0$  перераспределение МФ идёт так, что объёмы нек-рых фаз выравниваются. В этом случае при  $H > 0$ , а также в образцах, где МДС образовалась при  $H < 0$ , дальнейшее перераспределение фаз сводится к увеличению объёма тех из них, в к-рых направление вектора *M* наиб. близко к направлению *H*. В достаточно больших полях домены с энергетически невыгодной ориентацией *M* занимают всё меньший объём и полностью исчезают. В остальных областях вектор *M* поворачивается к направлению *H*. Заметим, что при  $H = 0$ ,  $M = M_r \neq 0$ , т. е. сохраняется намагниченность остаточная *M<sub>r</sub>*, а для полувещного состояния с  $M = 0$  необходимо приложить обратное поле  $-H = H_c$  ( $H_c$  — *кoэффициентная сила*). В разных образцах, в зависимости от соотношения *H<sub>0</sub>*, *H<sub>c</sub>* и *H<sub>0</sub>*, определяющими в П. могут быть задержки образования и роста зародышей П. или задержки смещений ДС.

В однодоменных частицах при уменьшении поля *H*, намагнитившего их под углом  $\phi$  к оси лёгкого намагничивания, вектор *M* обратным образом отклоняется от направления *H* и в полях обратного направления скачком поворачивается к направлению, близкому к *H*. Дальнейшее увеличение по абс. величине *H* (при  $H < 0$ ) приводит к уменьшению угла между *H* и *H*. Устойчивое обратное изменение *M* тем меньше, чем меньше  $\phi$ . При  $\phi = 0$  он равен нулю. В этом случае частица перематывается одним большим скачком вектора *M*. Причиной скачков является существование, наряду со стабильными, метастабильных состояний и больших

энергий, барьеров между ними. Скачки *M* происходят лишь в момент исчезновения указанного барьера между метастабильными и стабильными состояниями в результате изменения *H*.

Лит.: Воиновский С. В., Магнетизм, М., 1971.

В. Н. Филиппов.

**ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ** — звёзды, меняющие свой блеск. В ходе эволюции звёзд мощность излучения меняется у любой звезды, однако медленные эволюц. изменения блеска звёзд не привели к заметному суммарному эффекту за время, охваченное астрофотометрич. наблюдениями достаточной точности, и на практике не выявлены. К П. з. причисляют звёзды, изменения блеска к-рых (в УФ-, видимом или ИК-диапазоне) могут быть обнаружены при совр. точности наблюдений. Иногда делаются попытки проведения различия между собственно П. з. и нестационарными звёздами, активность (переменность) к-рых выплывает в осн. по спектральным признакам и ведёт лишь к малозаметным фотометрич. проявлениям. Поскольку, однако, по мере повышения точности наблюдений у большинства подобных звёзд обнаруживаются изменения блеска, проведение грани между П. з. и нестационарными звёздами затруднительно.

П. з. традиционно делятся на затменные и физические. Затменные П. з. — гравитационно связанные двойные звёзды, ориентация орбит к-рых и размеры компонентов таковы, что для земного наблюдателя периодически наступают затмения компонентов друг другом. Во мн. тесных двойных звёздах присутствуют газовые потоки и иного рода проявления активности, приводящие на фоне затменной переменности к изменениям блеска незатменного характера. По этой причине деление П. з. на затменные и физические является несколько условным.

В классификации П. з. помимо затменных выделены ещё пять больших классов, отличающихся причинами переменности: пульсирующие, взрывные и повоподобные (катаклизмические), эруптивные, вращающиеся и П. з., связанные с мощными источниками космич. рентг. излучения.

П у л ь с и р у ю щ и е П. з. являются автоколеб. системами, в к-рых энергия излучения звезды частично преобразуется в энергию колебаний (см. *Пульсирующие звёзды*). Механизмы пульсаций могут несколько отличаться у разл. типов пульсирующих П. з. К пульсирующим П. з. относятся цефеиды, звёзды типа RR Лирь, типа  $\delta$  Кита, типа Миры Кита и др. ПерIODы звёздных пульсаций — от неск. с до неск. лет. До недавнего времени были известны в основном звёзды с радиальными пульсациями. Различают звёзды, пульсирующие в осн. топе и в обертках. Выявлено немало звёзд, пульсирующих нерадиально, как правило, с малыми амплитудами переменности блеска. Встречаются звёзды, у к-рых одновременно возбуждены неск. мод пульсаций; это особенно характерно для звёзд с нерадиальными пульсациями.

На Герцишпрунга — Ресселла диаграмме мн. типы пульсирующих П. з. локализованы в пределах проходящей по всей диаграмме наклонной полосы, наз. цефеидной полосой неустойчивости. Звёзды в цефеидной полосе неустойчивости находятся на самых разл. стадиях эволюции и могут принадлежать к разным подсистемам Галактики. По светимости они могут относиться к любой последовательности диаграммы Герцишпрунга — Ресселла, от сверхгигантов (цефеиды и др.) до белых карликов (звёзды типа ZZ Кита).

Для цефеид — пульсирующих сверхгигантов плоской составляющей Галактики, периоды к-рых лежат в диапазоне от 1 сут до неск. десятков сут, существует исключительно важная зависимость между продолжительностью периода и ср. светимостью. Зависимость «период — светимость» даёт возможность определять расстояния до цефеид. Благодаря высокой светимости цефеид, позволяющей обнаруживать их не только в на-

шей, но и в др. галактиках, удалось на основе зависимости «период — светимость» проанализировать систему внегалактич. расстояний (см. *Расстояний шкала*).

Большинство звёздных и квазаров двойных звёзд представляет собой тесные двойные звёзды, один из компонентов к-рых — белый карлик. В ходе дисковой аккреции газа, перетекающего на белый карлик со спутника, могут создаваться условия для равнообратной активности типа вспышек. Поскольку источником газа является атмосфера связанной с белым карликом нормальной звезды, аккрецируемое вещество богато водородом. Если накопленный на поверхности белого карлика водород вступает в термоядерную реакцию, произойдет мощная вспышка, характерная для новых звёзд. Менее масштабные вспышки наблюдаются у т. н. карликовых новых (типа U Ближнего), по структуре двойной системы неотличимых от типичных новых звёзд. В качестве возможной причины вспышек карликовых новых рассматривается изменение скорости поступления вещества в аккреционный диск либо нестабильность диска, ведущая к изменению скорости поступления вещества через аккреционный диск к поверхности белого карлика. Симбиотич. П. з. (звёзды типа Z Андромеды) — системы, состоящие из гиганта, белого карлика и протяжённой оболочки. У этих звёзд на фоне неправильной (нерегулярной) переменности также нередко наблюдаются большие вспышки. Особое место среди П. з. занимают *сверхновые звёзды*. Вспышка сверхновой звезды, являющаяся одним из заключит. этапов эволюции звёзд с опред. параметрами, в настоящее время представляется единств. видом звёздной переменности, имеющим непосредств. эволюц. значение.

Зрелые звёзды меняют блеск из-за нестационарных процессов, происходящих в их атмосферах. Так, видимый блеск звёзд типа R Северной Короны может ослабевать в тысячу раз из-за образования в околозвёздном пространстве графитовых частиц, затеняющих свет звезды для наблюдателя. Подобная активность этих звёзд связана с необычным хим. составом (дефицит углерода, практически полное отсутствие водорода — обычно самого распространенного элемента в звёздных атмосферах). Большую группу зрелых П. з. составляют молодые звёзды, связанные с диффузными туманностями, — т. н. орлионы П. з. Те из них, спектры к-рых обладают характерной особенностью (аномально сильными эмиссионными линиями FeI,  $\lambda = 4063, 4132$ ), наз. звёздами типа T Тельца. Переменность орлионов звёзд носит преим. нерегулярный характер, нередко встречается вспышка либо ослабление блеска, напоминающие квазипериодич. изменения, связанные с появлением горячих пятен на поверхности вращающихся звёзд. Звёзды типа UV Кита — красные карлики, у к-рых периодически наступают вспышки с очень быстрым усилением блеска (взачастую за секунды) и более медленным спадом (см. *Вспыхивающие звёзды*). П. з. типа UV Кита принадлежат к наиб. слабым по светимости звёздам; многочисленность красных карликов определяет высокую распространённость П. з. этого типа в Галактике. К зрелым П. з. относятся также и самые яркие сверхгиганты (П. з. типа S Золотой Рыбы), неутоячивые в силу своей высокой светимости и меняющие блеск нерегулярным образом со значит. амплитудами.

Под в р а щ а ю щ и м с я П. з. понимаются звёзды, меняющие свой видимый блеск при осевом вращении из-за валичия на поверхности пятен, яркость к-рых отличается от яркости соседних участков, либо из-за отличия формы звезды от сферической (в тесных двойных системах — эллипсоидальных переменных). «Пятенная переменность» характерна для *цифических пекулярных звёзд*, у к-рых появление пятен связано с магн. полями. Крупные тёмные пятна вызывают переменность мн. холодных звёзд (звёзд типа VU Дракона),

предельные случаи такой переменности возможны и у более горячих звёзд, подобных Солнцу.

В отд. класс П. з. выделены оптически переменные объекты, связанные с сильными источниками космич. рентг. излучения. Практически все такие источники, отождествленные в оптич. диапазоне со звёздами, относятся П. з. Детальная классификация П. з. этого класса затруднена ввиду большого многообразия наблюдаемых явлений, приводящего к высокой степени индивидуальности каждого объекта. П. з. этого класса представляют собой тесные двойные звёзды, один из компонентов к-рых — компактный объект (чёрная дыра, нейтронная звезда или белый карлик).

Нек-рые П. з. могут относиться сразу к неск. классам. Так, у звёзд типа R Северной Короны помимо больших ослаблений блеска наблюдаются и пульсации. Нек-рые хим. пекулярные звёзды также меняют блеск из-за короткопериодич. пульсаций, наложенных на «пятенную» переменность. Весьма характерным является сочетание переменности типа VU Дракона и типа UV Кита, эллипсоидальной переменности и затенной переменности и т. п.

Лит.: Общий каталог переменных звёзд, под ред. П. Н. Холлоуа, 4 изд., т. 1, М., 1985; Variable stars and stellar evolution, ed. by V. E. Sherwood, L. Plaut, Dordrecht-Boston, 1975; Холлоу П. Н., Классификация переменных звёзд в свете современных представлений об их эволюции, в кн. *История науки и техники. Сер. Астрономия*, т. 22, М., 1983; Гофмейстер К., Рихтер Г., Вейгель В., *Переменные звёзды*, пер. с нем., М., 1961; *Переменные звёзды*, М., 1981.

**ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК** — электрический ток, изменяющийся во времени. В общем понимании к П. т. относят разл. виды импульсных, пульсирующих, периодич. и квазипериодич. токов. В технике под П. т. обычно подразумевают периодич. или почти периодич. токи перем. направления. Наиб. употребителен П. т., сила к-рого  $I$  меняется во времени по гармонич. закону (гармонический, или синусоидальный, П. т.):

$$I = I \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re}\{I \exp i(\omega t + \varphi)\}. \quad (*)$$

Здесь  $I$  — амплитуда,  $\varphi$  — нач. фаза,  $\omega$  — круговая частота. В эл.-технике (в частности, в радиотехнике) обычно реализуются квазистационарные цепи П. т. (см. *Квазистационарные (квазистатические) приближения*). При этом в многопроводных системах, предназначенных для передачи энергии, часто используют многофазные П. т. — текущие по разным проводам ток с одинаковыми амплитудами, но разными фазами. В частности, в симметричных трёхфазных системах фазы отличаются на  $2\pi/3$ . Большинство пассивных электрич. цепей работает в линейном режиме, когда справедлив *суперпозиция принцип*. При прохождении через такие цепи чисто гармонич. П. т. (\*) не искажают своей формы, тогда как при наличии нелинейных элементов (напр., железных сердечников в трансформаторах, нелинейных преобразователей, диодов, триодов и т. п.) синусоидальные сигналы искажаются, обогащаясь высшими гармониками. Квазистационарные цепи с сосредоточенными параметрами могут быть составлены как опред. комбинация индуктивностей  $L$ , ёмкостей  $C$  и сопротивлений  $R$ . Связь между напряжением  $u$  и силой П. т.  $i$  в этих элементах задаётся ф-лами

$$u = L \frac{di}{dt}, \quad u = RI, \quad C \frac{du}{dt} = I.$$

В нелинейных режимах величина  $L, C, R$  являются ф-циями протекающего тока  $I$ ; в линейных режимах они либо постоянны, либо зависят в явном виде от времени (параметрич. системы).

При расчёте электрич. цепей гармонич. П. т. удобно пользоваться комплексными амплитудными напряжениями  $\hat{U} = U \exp i\varphi_U$  ( $U$  — амплитуда напряжения) и токами  $\hat{i} = I \exp i\varphi_I$  и комплексными *импедансами*  $Z(\hat{U} = \hat{I})$ , принимаемыми на индуктивных, ёмкостных и резистивных участках соответственно значениями  $Z_L = i\omega L$ ,  $Z_C = (i\omega C)^{-1}$ ,  $Z_R = R$ . Тогда квазистационарная линейная цепь (многополюсник) любой сложности до-

пускает расчёт по обычным *Кирхгофа правилам*. Так, для последовательно включённых элементов  $L, C, R$  суммарный импеданс

$$Z = R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$

Это импеданс колебательного *LCR*-контура, высокодобротного при условии  $L/RC \gg 1$ . На резонансной (гомосоновской) частоте  $\omega = (LC)^{-1/2}$ , импеданс  $Z$  минимален по модулю. Метод комплексных амплитуд порождает метод векторных (круговых) диаграмм, основанных на графич. построении напряжений и токов как векторов на комплексных плоскостях, что даёт наглядность решаемым м. задач эл.-техники.

Мощность  $W$ , выделяемая в цепи П. т., определяется усреднением за период колебаний  $(2\pi/\omega)$  произведения  $i, j$ :

$$W = \frac{1}{2} UI \cos \varphi,$$

где  $\varphi$  — разность фаз между напряжением и током. Иногда вводят понятие эффективных (действующих) напряжений  $(U/\sqrt{2})$  и токов  $(I/\sqrt{2})$ , чтобы ф-ла для оптимально поглощаемой (отдаваемой) сопротивлению мощности имела тот же вид, что и для цепей пост. тока. Этот оптимум достигается при значении  $\varphi = 0$ . Такой режим наз. согласованным. При  $\varphi \neq 0$  часть мощности «отражается» обратно к источнику. Поэтому иногда проблему согласования в эл.-технике наз. проблемой оптимального *cos φ*.

С ростом частоты  $\omega$  квазистационарное приближение перестаёт быть справедливым, и для получения распределения П. т. необходимо обращаться непосредственно к *Максвелла уравнениям*. Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, иногда такие токи наз. *быстроперемещаемыми* (БПТ) и предпочитают оперировать не с суммарными (интегральными) силами тока, а с их объёмными плотностями  $j(r, t)$ . При протекании ко хорошо проводящим телам БПТ стремятся прижаться к их наружным поверхностям (скин-эффект). В случае идеальной проводимости они распределяются по самой поверхности; такие токи наз. *поверхностными* и характеризуются поверхностными плотностями. Плотность БПТ всегда можно разбить на потенциальную и вихревую компоненты. Последняя ответственна за возбуждение вихревых эл.-магн. полей. В открытых (неэкранированных) системах именно с вихревых П. т. связано излучение эл.-магн. энергии. Это, в частности, используется в излучателях (антеннах), где путём подбора надлежащих распределений БПТ создаются требуемые угл. распределения полей излучения (диаграммы направленности).

Лит.: Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле, 4 изд., М., 1979; Касаткин А. С., Немков М. В., Электротехника, 4 изд., М., 1983; Поляков И. О., К. Я., Личные электрические цепи с сосредоточенными постоянными, М., 1972.

**ПЕРЕМЕЩЕНИЕ** в механике — вектор, соединяющий положения движущейся точки в начале и в конце некоторого промежутка времени. Вектор П. направлен вдоль хорды траектории точки.

**ПЕРЕНОРМИРОВАННАЯ ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЁННОЙ** в квантовой теории поля (КТП) — вариант возмущенной теории (ВТ), используемый в перенормированной КТП и характеризующий тем, что исходные «заправочные» — величин (операторы полей, векторы состояний, константы взаимодействия) в каждом порядке перенормируются («перенормируются») с помощью спец. вычитательной процедуры. Эквивалентный способ представления П. т. в. состоит в использовании с самого начала конечных, физических, величин, но при этом в *лагранжеван* вводятся *контрчлены*, к-рые обеспечивают в каждом порядке ВТ сокращение больших поправок к нач. параметрам разложения. Методика П. т. в. предполагает возможность введения регуляризации в теорию и выбора «ре-нормализац. схемы», т. е. способа вычитания беско-

нечных членов теории регуляризации) вкладов в каждом порядке ВТ.

П. т. в. была сформулирована в работах Р. Фейнмана (R. Feynman), Ю. Швингера (J. Schwinger) и Ф. Дайсона (F. Dyson) в 1948—49. Первонач. идея содержалась в работе Х. Бете (H. Bethe, 1947), осуществившего перенормировку массы электрона при вычислениях *лямбовского сдвига*. Более строгое матем. обоснование процедура П. т. в. получила в работах Н. Н. Боголюбова и О. С. Парасюка в 1955 (см. *Боголюбова — Парасюка теорема*), а также К. Хенпа (K. Hepp, 1965) и В. Циммермана (W. Zimmermann, 1970).

П. т. в. возникла в связи с необходимостью устранения бесконечностей, возникающих при снятии регуляризации в высших порядках ВТ в *квантовой теории динамике* (КТД). Но в любых моделях КТП, содержащих расходимость, процедура перенормировки полей и констант является обязательной для получения осмысленных результатов. Методика П. т. в. допускает в принципе и конечные перенормировки, но их осуществление не обязательно и является вопросом удобства. Разл. ре-нормализац. схемы отличаются друг от друга конечными перенормировками (см. *Ренормализационная группа*).

П. т. в. можно проиллюстрировать на примере амплитуды рассеяния электрона во внеш. эл.-магн. поле. В низшем (перном) порядке, соответствующем *борновскому приближению* по затравочной константе взаимодействия («заряду»  $e$ ), эта амплитуда описывается *Фейнмановской диаграммой*, изображённой на рис. 1, и имеет вид

$$f(e_B, A_B) = e \gamma_\mu(p', p) A_{B\mu}(q), \quad (1)$$

где  $p, p'$  — 4-импульсы начального и конечного электрона,  $q = p - p'$  — переданный 4-импульс,  $A_{B\mu}(q)$  — фурье-образ эл.-магн. потенциала,  $\gamma_\mu(p', p)$  — матричный элемент электромагнитного тока по электронным

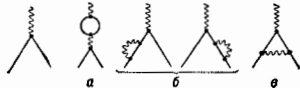


Рис. 1.

Рис. 2.

состояниях,  $\mu = 0, 1, 2, 3$  — лоренцев индекс (индекс  $B$  в обозначениях для заряда и поля от англ. слова *charge* — «голый»; он означает, что в низшем приближении не учитывается «стуба» из виртуальных частиц, сопровождающих электрон и фотон).

*Радикальные поправки* к (1) определяются диаграммами, изображёнными на рис. 2, к-рые содержат расходимости при больших виртуальных импульсах. В лоренцевой калибровке эл.-магн. поля (см. *Калибровочная инвариантность*) расходимость остаётся только в диаграммах 2а и б). Диаграммы 2б) приводят к перенормировке массы и волновой ф-ции электрона. Диаграмма 2а) даёт перенормировку заряда и внеш. поля. Проанализируем подробнее только вклад диаграммы 2а), ограничившись для простоты двумя предельными случаями: 1)  $q^2 \rightarrow 0$ ; 2)  $-q^2 \gg m^2$ , где  $m$  — масса электрона. Регулируем эту диаграмму с помощью процедуры Паули — Вилларса (см. *Регуляризация расходимостей*). Если  $M$  — масса кванта регуляторного поля, то в первом случае ( $q^2 \rightarrow 0$ ) сумма диаграмм 1 и 2а)

$$F = f(e_B, A_B) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_B \ln \frac{M^2}{m^2}}{3\pi}\right), \quad (2)$$

а во втором случае (при  $M^2 \gg -q^2 \gg m^2$ )

$$F = f(e_B, A_B) \left(1 - \frac{\alpha_B \ln \frac{M^2}{q^2}}{3\pi}\right). \quad (3)$$

В этих выражениях удержаны только большие логарифмич. вклады;  $\alpha_B \equiv e^2_B/4\pi$ .

Видно, что в терминах исходных параметров ВТ «не работает», т. е. в следующем за борновским приближении возникают большие поправки ( $\sim \alpha_B \ln M^2$ ). Методика П. т. в. позволяет исправить ситуацию. Перепределим в ф-ле (2) заряд и потенциал вне поля:

$$e_B = Z^{1/2} e_R, \quad A_B = Z^{1/2} A_R, \quad (4)$$

где

$$Z^{-1} = 1 - \frac{\alpha_B \ln \frac{M^2}{m^2}}{3\pi}. \quad (5)$$

Тогда амплитуда  $F$ , выраженная в переменных  $e_R$  и  $A_R$  (индекс  $R$  от англ. слова renormalized), примет тот же вид, что и борновская амплитуда в (1), но с заменой  $e_B \rightarrow e_R$ ,  $A_B \rightarrow A_R$ :

$$F = f(e_R, A_R). \quad (6)$$

Т. о., если с самого начала использовать как параметры рассеяния величины  $e_B$  и  $A_B$ , то диаграмму 2(a) при  $q^2 \rightarrow 0$  вообще не следует рассматривать. Иначе говоря, нужно «руками» вычистить ел вклад в точке  $q^2 = 0$ . Это удобно осуществить, добавив контрольел в исходной лагранжиане теории, подобрав его так, чтобы он в соответствующем порядке компенсировал диаграмму 2(a) в точке  $q^2 = 0$ . После добавления контрольел в лагранжиане должны уже фигурировать «перенормированные» величины  $e_B$  и  $A_B$ . (Необходимо также добавить контрольел для перенормировки массы и волновой ф-ции электрона, к-рые здесь для простоты не обсуждаются.) Вид контрольел обычно фиксируется требованиями локальности и симметрии.

Такую же процедуру можно осуществить и в след. порядках ВТ. В результате, напр.,  $e_R$  и константа перенормировки  $Z$  окажутся формальным рядом по затравочному заряду  $e_B$ .

Последоват. схема вычитания расходящихся подграфов в диаграммах Фейнмана при нулевых импульсах (к-рая отвечает итерациям контрольелов в высш. приближениях ВТ) дается  $R$ -операцией.

После выполнения вычитат. процедуры амплитуда рассеяния при  $q^2 = 0$  будет совпадать с борновской амплитудой (6) уже во всех порядках ВТ. Точная амплитуда  $F$  оказалась как бы «перенормированной» на борновскую в отд. точке  $q^2 = 0$ . Поэтому о величине  $q^2 = 0$  в рассматриваемой ренормализац. схеме иногда говорят как о «точке вычитания», или «точке нормировки».

Поскольку при  $q^2 = 0$  к амплитуде  $F$  по построению нет больших поправок от высш. порядков ВТ, то искусственно введенный перенормированный заряд  $e_R$  непосредственно измеряется по значению борновской амплитуды в рассеянии электрона во внеш. поле на малые углы. Поэтому параметр  $e_R$  наз. ф. и з. а р я д о м электрона.

Подчеркнем, что введение перенормированных величин, согласно ф-ле (4), делает конечной амплитуду рассеяния при любых значениях  $q^2$ . Это связано с логарифмич. характером расходимости диаграммы 2(a). Достаточно одного вычитания в произвольной точке, чтобы сделать диаграмму конечной. В частности, с точностью до членов  $\sim \alpha_B^2$  после подстановки (4) амплитуда (3) приобретает вид

$$F_{q^2 \rightarrow m^2} = f(e_R, A_R) \left( 1 - \frac{\alpha_B \ln \frac{m^2}{q^2}}{3\pi} \right) \quad (7)$$

и не содержит массы регулятора.

Описанная схема не годится для асимптотически свободных теорий (см. Асимптотическая свобода), в частности для квантовой хромодинамики (КХД). В таких теориях заряд, определенный через значение борновской амплитуды рассеяния, при нулевом импульсе оказывается большим и ВТ по этому параметру не существует. Эта трудность обходится выбором точки нормировки там, где заряд мал, т. е. при  $-q^2 = \mu^2 \gg \Lambda^2$ , где  $\Lambda$  — характерный массовый параметр в

асимптотически свободных теориях (положение ИК-полюса в аффе́ктивном заряде).

В рассмотренном выше простейшем примере тоже возможен такой способ перенормировки. Ему соответствует вычитание вклада диаграммы 2(a) в точке  $-q^2 = \mu^2$ . При этом амплитуда рассеяния совпадает с борновской —  $q^2 = \mu^2$ , а в качестве заряда и поля в борновской амплитуде рассеяния фигурируют величины

$$e_R(\mu) = Z_\nu^{-1/2}(\mu) e_B, \quad A_R(\mu) = Z_\mu^{-1/2} A_B, \quad (8)$$

где  $Z_\nu^{-1} = 1 - (\alpha_B/3\pi) \ln(M^2/\mu^2)$ . При произвольных, но больших значениях  $q^2$  амплитуда рассеяния теперь равна:

$$F = f(e_R(\mu), A_R(\mu)) \left( 1 - \frac{\alpha_B(\mu) \ln \frac{\mu^2}{q^2}}{3\pi} \right), \quad (9)$$

а при  $q^2 \rightarrow 0$ :

$$F = f(e_R(\mu), A_R(\mu)) \left( 1 - \frac{\alpha_B(\mu) \ln \frac{\mu^2}{m^2}}{3\pi} \right). \quad (10)$$

Если  $\alpha_R(\mu) \ll 1$ ,  $\alpha_B \ln(\mu^2/m^2) < 1$ , то  $\alpha_R(\mu)$  и  $A_R(\mu)$  могут использоваться в качестве параметров в П. т. в.

В КХД выбор точки нормировки  $-q^2 = \mu^2$  для практич. целей является менее удобным, но в КХД — это единств. возможность. Причём в КХД возникает ряд дополнит. усложнений, связанных, в частности, с необходимостью рассматривать как глюоны, так и кварки вне массовой поверхности (с виртуальными  $-p^2 \gg \Lambda^2$ ). Спец. мерн. приходится также применять для поддержания калибровочной инвариантности в процессе регуляризации и перенормировки.

Лит.: Шв е б е р С., Введение в релятивистскую квантовую теорию поля, пер. с англ., М., 1963; В о р г о л о в И. Н., Ш и р к о в Д. В., Квантовое поле, 2 изд., М., 1990; В о л о ш и н М. Е., Т е р - М а р т и н о с я н К. А., Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц, М., 1984; Р а м о н П., Теория поля. Современный вводный курс, пер. с англ., М., 1984. М. В. Терешин.

**ПЕРЕНОРМИРОВКИ** (ренормировки) в квантовой теории поля (КТП) — процедура устранения ультрафиолетовых расходимостей. П. проводится в процессе решения квантовых ур-ний и в целом представляется в виде особого предписания, формулируемого дополнительно к осн. закону движения ур-нию Шрёдингера. Др. значение термина «П.» связано с конечными изменениями параметров лагранжиана КТП, приводящими к ренормализационной группе (см. ниже).

УФ-расходимости возникают в квантовополевой теории возмущений при вычислении интегралов в пространстве 4-импульсов соответствующих Фейнмана диаграмм, содержащим замкнутые петли. Путём введения вспомогат. регуляризаторы такие расходящиеся интегралы делаются конечными и вычисляются в явном виде; при этом в простейших случаях сингулярные составляющие выделяются в аддитивные структуры, имеющие вид полюсов невысокой степени по внеш. импульсам [см. ф-лу (3) в ст. Регуляризация расходимостей]. Для нек-рого класса КТП степень этих полюсов не зависит от порядка теории возмущений и не превышает двух. Такие теории допускают процедуру П., с помощью к-рой удаётся полностью устранить все УФ-расходимости и выразить результаты вычислений через небольшое число параметров, физические близки к параметрам (массам, константам связи) исходного лагранжиана рассматриваемой системы взаимодействующих полей. Эти теории наз. п е р е н о р м и р о в а н н ы м и. В класс перенормируемых теорий (с нек-рыми оговорками) входят модели с безразмерными константами связи, в т. ч. теории калибровочных полей, такие как квантовая электродинамика (КЭД) и квантовая хромодинамика (КХД).

В перенормируемых теориях оказывается возможным собрать все сингулярные составляющие матричных элементов и Грина функций в небольшое число струк-



тур, к-рые в конечном счёте могут быть сведены к полевым добавкам к параметрам исходного лагранжиана.

В КЭД, напр., все расходимости сводятся к полевым добавкам  $\delta m$  и  $\delta e$  к массе и заряду электрона. Формально эти добавки можно выразить через некие числовые, обобщённо сингулярные, множители  $Z_m$  и  $Z_e$  к исходным (т. н. голым или затравочным) массе  $m_0$  и заряду  $e_0$ :

$$m_0 + \delta m = Z_m m_0, \quad e_0 + \delta e = Z_e e_0. \quad (1)$$

Вычисляемые физ. величины, такие как матричные элементы переходов, содержат зависимости только от произведений  $Z_m m_0$  и  $Z_e e_0$ . Затравочные масса и заряд, а также УФ-сингулярности по отдельности или в к.-л. др. комбинациях в них не входят. Поэтому возникает возможность отождествить произведения (1) с аксерим. («физическими») значениями массы и заряда электрона:

$$Z_m m_0 = m_{\text{физ}}, \quad Z_e e_0 = e_{\text{физ}}. \quad (2)$$

Эта операция переопределения физ. параметров

$$m_0 \rightarrow m_{\text{физ}} = Z_m m_0, \quad e_0 \rightarrow e_{\text{физ}} = Z_e e_0 \quad (3)$$

путём их умножения на сингулярные множители, полностью исключающая УФ-расходимости из наблюдаемых физ. величин, и наз. операцией П. (иногда П. бесконечности).

Теория П. в КТП была разработана в кон. 1940-х — нач. 50-х гг. в трудах Ю. Швингера (J. Schwinger), Р. Фейнмана (R. Feynman), Ф. Дайсона (F. Dyson), А. Салама (A. Salam), Н. Н. Боголюбова.

С качеств. точки зрения изменение масс и зарядов частиц под влиянием взаимодействия представляется вполне естественным. Подобные явления известны из классич. электродинамики: сторонний заряд в среде создаёт вокруг себя облако поляризации, к-рое частично его экранирует. Поэтому на больших расстояниях эфф. значение наблюдаемого заряда оказывается меньше истинного. При перемещении такой частицы вместе с ней движется и облако поляризации, что приводит к эфф. изменению её инерционных свойств, т. е. массы. Изменения массы и заряда частицы в этом случае конечны.

В КТП подобная физ. интерпретация соотношений П. (3) затруднена из-за сингулярного характера констант П.  $Z_m$ ,  $Z_e$ . В отличие от стороннего заряда в поляризуемой среде, к-рый можно «навлечь из среды и исследовать в пустоте, электрон в КТП не может быть «освобождён» от взаимодействия с квантовым эл.-магн. полем вакуума. Поэтому входящие в соотношения П. величины  $m_0$ ,  $e_0$ ,  $Z_m$  и  $Z_e$  не могут быть измерены на опыте по отдельности, а лишь в комбинациях (2). В результате П. получаются конечные и однозначные выражения, к-рые в ряде случаев описывают эксперимент с чрезвычайной высокой степенью точности. Так, значение аномального магнитного момента электрона, вычисленное в КЭД, совпадает с опытным значением на уровне аксерим. погрешности порядка  $10^{-10}$ , что является рекордом в физике.

Операция устранения расходимостей может быть формализована и без использования соотношений П. типа (2), т. к. в пространственно-временном представлении УФ-расходимости обусловлены особенностями пропагаторов (одночастичных ф-ций Грина) Штюкельберга — Фейнмана [Е. С. G. Stueckelberg, 1948; Фейнман, 1949] по перенормировке квадрата интервала  $s^2 = -c^2 t^2 - x^2$  на поверхности светового конуса ( $s^2 = 0$ ). Поскольку радиационные поправки к матричным элементам выражаются в этом представлении через произведения пропагаторов, приходится оперировать с произведениями подобных сингулярностей, напр. с квадратами дельта-функции Дирака от  $s^2$ . С матем. точки зрения проблема сводится к задаче определения операции умножения обобщённых функций.

Теория умножения обобщённых ф-ций, возникающих в квантовополевых вычислениях, была разработана

Н. Н. Боголюбовым в нач. 50-х гг. Проблема устранения расходимостей была затем рассмотрена на её основе Н. Н. Боголюбовым и О. С. Параскоком. Доказанная ими теорема о П. (см. Боголюбова — Параскока теорема) с полной матем. строгостью исчерпывающе решает задачу получения конечных однозначных выражений для элементов матрицы рассеяния в рамках теории возмущений, без обращения к промежуточной регуляризации, контролемам и сингулярным соотношениям П. типа (3). Репентурная часть теории Боголюбова — Параскока, т. н. R-операция Боголюбова, уже около трёх десятилетий является практич. основой получения конечных результатов в перенормируемых моделях КТП.

Как отмечалось, термин «П.» отсылается также и к конечным преобразованиям типа (3):

$$m \rightarrow Z_m m, \quad e \rightarrow Z_e e, \quad (4)$$

где  $Z_m$ ,  $Z_e$  — конечные числа. Возможность и важность таких преобразований к конечной перенормировке, проводимых в квантовополевом формализме после устранения расходимостей, связаны с неоднозначностью результата процедуры устранения бесконечностей. Анализ структуры этих неоднозначностей, к-рая описывается преобразованиями (4), указывает на существование особой симметрии перенормируемых выражений — симметрии, лежащей в основе репермализации группы.

Лит. Боголюбов Н. Н., Ширнов Д. В., Квантовые поля, 2 изд., М., 1981.

Д. В. Ширков.

**ПЕРЕНОРМИРУЕМОСТЬ** в квантовой теории поля (КТП) — свойство модели взаимодействия релятивистских полей, отвечающее возможности её непротиворечивого квантового рассмотрения и, в частности, устранения ультрафиолетовых расходимостей с помощью процедуры перенормировки.

В КТП модели разделяются на два класса: перенормируемые и неперенормируемые. В моделях, обладающих свойством П., удаётся убрать все расходимости в перенормировки параметров (масс, констант связи и др.) исходного лагранжиана и в конечном итоге однозначно выразить результаты вычислений через перенормированные (физические) значения соответствующих параметров.

Упрощённым, но достаточно надёжным признаком П. может служить размерность константы связи. Так, в моделях КТП с лагранжианом взаимодействия вида

$$g_1 \varphi^4, \quad g_2 \bar{\psi} O \psi \psi \quad \text{и} \quad g_3 \bar{\psi} O' \psi B,$$

[ $\varphi$  — скалярное,  $\psi$  и  $\bar{\psi}$  — спинорные,  $B_\mu$  — векторное поле;  $O, O'$  ( $\varphi = 0, 1, 2, 3$ ) — матрицы, определяющие вид взаимодействия; черта над  $\psi$  означает дираковское сопряжение] константы связи безразмерны. Соответственно этому величины  $g_1$ ,  $(g_2)^2$  и  $(g_3)^2$  являются естественн. безразмерными параметрами разложения, вследствие чего регуляризованная теория возмущений (см. Регуляризация расходимостей) в УФ-пределе  $q^2 \gg m^2$  ( $q$  — 4-импульс,  $m$  — наибольшая из имеющихся масс) может содержать только степени этих величин и их произведений на логарифмы  $\ln(\Lambda^2/q^2)$ , где  $\Lambda$  — импульс обрезания. Поэтому вполне естественно, что в таких моделях степень расходимости фейнмановских диаграмм с логарифмич. точностью не зависит от порядка теории возмущений. Вследствие этого операторная структура контролема, осуществляющих «умножение» расходившихся вкладов, не зависит от порядка теории возмущений, что и приводит к П.

В то же время для моделей четырёхфермионного или юкавского векторного типов

$$G \bar{\psi} O_1 \psi \bar{\psi} O_2 \psi, \quad \bar{\psi} O' \psi \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

где константы связи обладают отрицат. массовой размерностью, безразмерные комбинации содержат положит. степени импульса обрезания:  $GA^2$ ,  $f\Lambda$ , вследствие

чего степень расхождимости растёт вместе со степенью константы связи и перенормировка оказывается невозможной.

Простота этой картины в некоторых случаях нарушается. Так, если в третьем из приведённых выше лагранжианов взаимодействия с безразмерными константами связи векторное поле  $B_\mu$  имеет массу  $M$ , то возможно образование безразмерной комбинации с её участием:  $g_3 \Lambda / M$ , и свойство П. исчезает. В реальных случаях этой оговорки, по-видимому, можно пренебречь, поскольку известные массивные векторные поля ( $W$ - и  $Z$ -бозоны) имеют калибровочную природу, а калибровочные поля «первоначально» безмассовы и «приобретают» массу в результате спонтанного нарушения симметрии, при чём свойство П. не нарушается. Осложнения могут также возникнуть для калибровочного взаимодействия фермионов, не сохраняющего чётности. В этом случае приходится иметь дело с т. н. аномалиями. С учётом этих оговорок безразмерность констант связи есть необходимое и практически достаточное условие П.

Для ответа на вопрос о физ. смысле свойства П. заметим, что квантовые радиационные поправки следует рассматривать как эффекты реакции квантового вакуума на прохождение через него тех или иных микрочастиц. УФ-расхождимости квантовых поправок обусловлены тем, что вакуумные КВ-флуктуации оказываются чрезмерно интенсивными. В перенормируемых моделях КТП их эффект удаётся свести к изменению физ. параметров частиц. С этой точки зрения П. отвечает тому, что для перенормируемых механизмов взаимодействия влияние малых расстояний, где сосредоточены ВЧ-флуктуации, на физику больших (в микроскопич. смысле) расстояний может быть эффективно учтено с помощью ограниченного числа конечных параметров.

Можно также сказать, что перенормируемые модели взаимодействия полей отвечают случаям, когда не удаётся построить последовательную квантовую теорию полей с данным механизмом взаимодействия. Иными словами, такие модели в сущности не удаётся проквантовать. Отсюда можно сделать вывод, что П. является синонимом «квантовой» теории.

Лит.: Б о с о л я б о в И. И., Ш и р к о в Д. В., Квантовые поля, 2 изд., М., 1981; Б е л о к о р о в В. В., Ш и р к о в Д. В., Теория взаимодействий частиц, М., 1986.

**ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ** — распространение эл.-магн. излучения, звука, нейтронов и др. частиц в различных средах: в свободном пространстве, в регулярно-неоднородных и случайно-неоднородных (турбулентных) средах, в средах с дискретными рассеивателями и т. д. при наличии процессов поглощения, испускания и рассеяния. Традиционно П. и. рассматривают в разл. разделах оптики, в частности при описании фотометрич. измерений, выяснении условий формирования оптич. изображений, нахождения характеристик рассеянного излучения и др. В классич. теории П. и. подлучена из энергетич. соображений и служит основой фотометрии. Кроме того, теорию П. и. применяют в астрофизике при расчёте светимости звёзд, в теплофизике при анализе теплопередачи через излучение, в геофизике при изучении теплового баланса Земли, а также в акустике, теории плазмы и ядерной физике.

Начало теоретич. фотометрии и теории П. и. как раздела науки связывают обычно с именами П. Бугера (P. Bouguer) и И. Ламберта (J. Lambert). Применительно к рассеивающим средам основы теории П. и. заложил О. Д. Хвольсон (1890) и А. Шустер (A. Schuster, 1905). Фотометрия оперирует с энергетич. характеристиками, описывающими отклик квадратичных приёмников излучения. Классич. феноменологич. теория П. и. использует наглядные понятия лучевой оптики, дополненные статистич. предположением о полной взаимной неогертенности полей для лучей, имеющих разное направление. Это предположение позволяет

суммировать ср. интенсивности лучей, приходящих с разл. направлений, игнорируя фазовые соотношения (аналогичное допущение в нелинейной теории волн известно как приближение случайных фаз).

Совр. теория П. и. основывается на статистико-волновом подходе, когда излучение и среда трактуются как два взаимодействующих случайных поля и излучение считается статистически квазидиффузным.

**Основные понятия.** В классич. теории переноса скалярного излучения в свободном пространстве, рассматривающей волновое поле как совокупность некогерентных лучевых пучков, осн. понятием является спектральная яркость  $I = I(r, t, \omega, n)$ , к-рая определяет ср. поток энергии  $dS$  через площадку  $da$ , сосредоточенный в телесном угле  $d\Omega_n$  вблизи направления  $n$  и в интервале частот  $d\omega$ :  $dS = I(r, t, \omega, n) da d\Omega_n d\omega$ . Поэтому ср. плотность потока энергии  $S$  в точке  $r$  в момент времени  $t$  равна:

$$S(r, t) = \int n I(r, t, \omega, n) d\Omega_n d\omega.$$

Ср. плотность энергии поля равна:

$$W(r, t) = \int I(r, t, \omega, n) v_g^{-1} d\Omega_n d\omega,$$

где  $v_g$  — групповая скорость распространения излучения. Эти соотношения сохраняют силу и для разреженных рассеивающих сред.

Основой волновой теории П. и. служит интегро-дифференц. ур-ние переноса излучения. Для неизменной во времени статистически однородной рассеивающей среды оно имеет вид:

$$dI/ds = -\alpha I + \int \sigma(n \leftarrow n') I(r, t, \omega, n') d\Omega_{n'} + Q(r, n), \quad (1)$$

где  $dI/ds = n \nabla + v_g^{-1} \partial/\partial t$  — производная вдоль луча,  $Q$  — функция источников,  $\alpha$  и  $\sigma(n \leftarrow n')$  — феноменологич. параметры, наз. коэффициентами экстинкции и сечением рассеяния из направления  $n'$  в направлении  $n$ . Ур-ние (1) с соответствующими нач. и граничными условиями определяет поведение яркости  $I$ . Эта задача привела к формированию самостоят. ветви матем. физики — матем. теории П. и.

Ур-ние (1) выражает баланс энергий в бесконечно малом объёме среды: скорость изменения яркости  $I$  вдоль луча определяется рассеянием в данное направление  $n$  со всех др. направлений  $n'$  (интегральный член) и ослаблением из-за рассеяния и поглощения (член  $-\alpha I$ ). Коэф. экстинкции  $\alpha$  выражается в виде суммы,  $\alpha = \alpha_a + \alpha_s$ , энергетич. коэффициента поглощения  $\alpha_a$  и коэф. экстинкции  $\alpha_s$ , связанного с сечением рассеяния соотношением

$$\alpha_s = \int \sigma(n \leftarrow n') d\Omega_{n'}.$$

Вне области источников выполняется ур-ние интегрального энергетич. баланса

$$\partial W/\partial t + \nabla S = - \int \alpha I d\Omega_n.$$

Для квазидиффузных и квазистационарных сред  $\alpha$  и  $\sigma(n \leftarrow n')$  зависят от  $r$  и  $t$ . В случае рассеяния с изменением частоты в интегральном члене в (1) появляются дополнит. интегрирование по частоте. При учёте векторного характера эл.-магн. поля яркость  $I$  нужно заменить на яркостную матрицу, к-рая описывает не только интенсивность, но и поляризацион. свойства излучения, причём  $\alpha$  и  $\sigma(n \leftarrow n')$  также становятся матричными величинами. Скалярное ур-ние (1) используют в оптике для описания светового излучения в тех случаях, когда можно пренебречь поляризацион. эффектами.

Аналогичные ур-ния с нелинейной правой частью используют при описании эл.-магн. излучения в плазме (т. н. кинетич. ур-ния для волн).

Поскольку ур-ние (1) основано на лучевых понятиях, в нём акцентируется лишь корпускулярная сторона дуализма волна — частица. Поэтому ур-ние (1) служит также основой теории переноса нейтронов, где вместо яркости  $I$  фигурирует одностативная ф-ция распределения нейтронов по скоростям, а ур-ние аналогично линеаризованному кинетическому уравнению Больцмана. При квантовой интерпретации излучения яркость  $I$  пропорциональна ф-ции распределения фотонов по направлениям и по частотам.

Обоснование теории П. и. было достигнуто в рамках статистич. оптики, к-рая ур-ние П. и. выводит из ур-ний Максвелла на основе волновых понятий, описывающих когерентные свойства излучения. При таком подходе яркость  $I$  связана с Вигнера функцией распределения  $J_k(R)$ , а последняя — с ф-цией когерентности  $\Gamma(R, \rho)$  комплексной амплитуды поля. Для скалярного монохроматич. поля  $u(r)\exp(-i\omega t)$ , для к-рого

$$\Gamma(R, \rho) = \langle u(R + \rho/2)u^*(R - \rho/2) \rangle,$$

где (...) означает статистич. усреднение, \* — комплексное сопряжение,  $\rho = r_1 - r_2$  — разность, а  $R = (r_1 + r_2)/2$  — «центр тяжести» радиусов-векторов точек наблюдения  $r_1$  и  $r_2$ , ф-ция Вигнера определяется как

$$J_k(R) = \int \Gamma(R, \rho) \exp(-ik\rho) d\rho / (2\pi)^3. \quad (2)$$

Для свободного статистически однородного поля ф-ция когерентности  $\Gamma$  зависит только от  $\rho$ , а ф-ция  $J_k(R)$  связана с яркостью  $I$  соотношением

$$J_k = bI(n)\delta(|k| - k_0)k_0^{-2}, \quad (3)$$

где  $k_0$  — волновое число,  $b$  — коэф. пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц. Появление в (3) дельта-функции обусловлено волновым характером рассматриваемого излучения: волновые векторы составляющих поле плоских волн локализованы на поверхности  $|k| = k_0$ , при этом, согласно Вигнера — Хинчина теореме,  $I(n) \geq 0$ .

Соотношение (3) приближенно сохраняется для квазизводородного поля, ф-ция когерентности к-рого плавно зависит от  $R$ :

$$J_k(R) = bI(R, n)\delta(|k| - k_0)k_0^{-2}. \quad (4)$$

Условие квазизводородности можно записать в виде неравенства  $|\partial\Gamma/\partial R| \ll |\partial\Gamma/\partial\rho|$ , к-рое означает малость изменений ф-ции когерентности по аргументу  $R$  в сравнении с её изменениями по разностной переменной  $\rho$ . Классич. фотометрия соответствует некогерентному излучению, когда  $|\partial\Gamma/\partial\rho| \sim \lambda^{-1}\Gamma$  и  $\lambda \rightarrow 0$ .

Входящую в (4) величину  $I(R, n)$  считают о б о б щ ё н н о в 2, 4) величину  $I(R, n)$  пропорц. преобразованию Фурье от ф-ции когерентности  $\Gamma$  по разностной переменной  $\rho = r_1 - r_2$ , поэтому

$$\Gamma(R, \rho) = \int J_k(R) \exp(ik\rho) dk = b \int I(R, m) \exp(ik_0\rho) d\Omega_m, \quad (5)$$

Значение соотношения (5) состоит в том, что оно связывает энергич. характеристику излучения (яркость  $I$ ) с волновыми и статистич. характеристиками, а именно: с ф-цией когерентности волнового поля. Напр., для однородного и изотропного излучения яркость  $I$  не зависит от направления  $n$ , поэтому

$$\Gamma(\rho) = 4\pi b(k_0\rho)^{-1} \text{isinh}k_0\rho.$$

Т. о., соотношение (5) позволяет переходить от лучевого (энергетич.) описания к волновому (дифракционному) и тем самым извлекать из ур-ния П. и. их некие сведения о дифракц. эффектах.

В общей теории многократного рассеяния из ур-ния, определяющего поведение ф-ции когерентности  $\Gamma$ , следует, что обобщённая яркость  $I(R, n)$  для достаточно

разреженных рассеивающих сред удовлетворяет ур-нию П. и. классич. теории (1). Тем самым устанавливается строгий статистич. смысл ур-ния П. и., однофеноменологич. найдя выражения для входящих в (1) феноменологич. коэф., к-рые в этом случае мало отличаются от результатов, полученных в приближении однократного рассеяния. Такой подход позволяет использовать хорошо развитый матем. аппарат теории П. и. для описания нек-рых дифракц. и интерференц. эффектов, связанных с частичной когерентностью излучения. В общем случае величина  $I(R, n)$  не обладает всеми свойствами феноменологич. яркости, в частности, не является всюду неотрицательной.

Крупномасштабная среда. Статистико-волновое содержание теории П. и. наглядно проявляется на примере крупномасштабной статистически однородной рассеивающей среды. Ф-ция когерентности  $\Gamma = \langle u(\xi_1, z)u^*(\xi_2, z) \rangle$ ,  $\xi = (x, y)$ , монохроматич. поля, распространяющегося в направлении оси  $z$ , удовлетворяет ур-нию

$$2ik_0\partial\Gamma/\partial z + [\Delta_{\xi_1} - \Delta_{\xi_2} + A(0) - A(\xi_1 - \xi_2)]\Gamma = 0 \quad (6)$$

(см. Параболическое уравнение приближение). Величина  $A(\xi_1 - \xi_2)$  выражается через ф-цию корреляции флуктуаций среды в точках  $(\xi_1, z)$  и  $(\xi_2, z)$ . Отвечающая этому случаю обобщённая яркость  $I$  определяется соотношением

$$I(R_{1,2}, \nu) = (k/2\pi)^2 \int \exp(-ik\nu v) \Gamma(R_1 + \xi/2, R_1 - \xi/2, z) d\xi.$$

Здесь  $\nu$  — поперечная часть единичного вектора  $n = (v, \sqrt{1-v^2})$ , к-рая играет роль угл. переменной и описывает направление излучения. Яркость  $I(R_{1,2}, \nu)$  удовлетворяет вытекающему из (6) ур-нию П. и.:

$$dI/ds \equiv (\partial/\partial z + \nu v R_1)I = -\alpha I + \int [\sigma(v - v')I(R_1, z, \nu') d\nu', \quad (7)$$

где  $\alpha = A(0)$ , а сечение рассеяния  $\sigma(v - v')$  выражается через преобразование Фурье от  $A(\xi)$ . Поскольку ур-ние (7) эквивалентно ур-нию (6), оно учитывает все дифракц. эффекты, описываемые волновым ур-нием (6).

В ряде случаев решение ур-ния (7) можно записать в явном виде. В простейшем случае свободного пространства ( $\alpha = \sigma = 0$ ) решение имеет вид

$$I(R_{1,2}, \nu) = I_0(R_1 - \nu z, \nu), \quad (8)$$

где  $I$  — обобщённая яркость при  $z > 0$ , а  $I_0$  — распределение обобщённой яркости в нач. плоскости  $z = 0$ . Это выражение отвечает сохранению величины  $I$  вдоль «обобщённого» прямого луча, к-рый, в отличие от обычной геом. оптики, строится для координаты  $R$ .

В феноменологич. теории, использующей предельный переход  $\lambda \rightarrow 0$ , для исходной яркости  $I_0$  можно задавать произвольное угл. распределение, ограниченное единств. условием  $I_0 \geq 0$ . В ф-ле (8) обобщённая яркость  $I$  связана преобразованием Фурье с нач. ф-цией когерентности  $G_0 = \Gamma|_{z=0}$ , поэтому требование  $I_0 \geq 0$  становится излишним. Эфф. угл. ширина  $\Delta\theta = |\nu|$  обобщённой яркости  $I$  [т. е. масштаб изменения  $I(R_{1,2}, \nu)$  по аргументу  $\nu$ ] подчиняется соотношению неопределённости  $\Delta\rho_1 \Delta\theta \geq \lambda$ , где  $\Delta\rho_1$  — эфф. ширина ф-ции когерентности  $G_0$  по аргументу  $\rho_1$ , по порядку величины совпадающая с поперечным масштабом пространственной когерентности пучка (в классич. фотометрии соотношение неопределённости не возникает из-за предельного перехода  $\lambda \rightarrow 0$ ). Продольный масштаб когерентности оценивается при помощи ф-лы (5), к-рая в этом приближении принимает вид:

$$\Gamma = b \int I(R, z, \nu) \exp\{ik[\rho_2(1 - \nu^2/2) + \rho_1 \nu]\} d\nu,$$

откуда  $\Delta\rho_2 \sim \lambda/(\Delta\theta)^2$ .

Описанный подход позволяет построить статистич. теорию переноса частично когерентного излучения и даёт возможность обосновать феноменологич. теорию для разреженных слабо рассеивающих сред. В противоположном случае плотных и сильно рассеивающих сред существ. роль начинают играть когерентные и кооперативные эффекты, при этом вопрос об области применимости феноменологич. ур-ния П. и. остаётся до конца не выясненным. Для таких сред фазовые соотношения между рассеянными волнами могут играть определяющую роль. Кооперативные эффекты приводят, в частности, к фундаментальному для теории аморфных тел явлению — *андерсоновской локализации* и, как следствие, к качеств. изменению характера П. и. Напр., ур-ние П. и. не в состоянии описать эффекты сильного рассеяния в одномерной модели рассеивающей среды.

Ур-ние П. и. описывает и др. виды волнового движения, при этом «яркость»  $I$  вводит при помощи соотношения (3) с подходящим значением коэф.  $b$ , напр. в случае звукового поля  $b = \rho \omega^2 Z$ , где  $\rho$  — плотность среды,  $\omega$  — скорость звука.

Лит.: Чандрасекар С., Перенос лучистой энергии, пер. с англ., М., 1953; Саложников Р. А., Теоретическая фотометрия, 3 изд., М., 1977; Рыто в С. М., Крайко в Ю. А., Гатауров и Б. И., Введение в статистическую радиофизику, ч. 2 — Случайные поля, М., 1978; Адресян И. А., Крайко в Ю. А., Теория переноса излучения. Статистические и волновые аспекты, М., 1983. Л. А. Адресян, Ю. А. Крайко.

**Перенос излучения в условиях негмонотонности элементарного акта рассеяния.** Изложенный выше раздел теории П. и. относится к области  $l \geq a$ , где  $l$  — длина волны излучения,  $a$  — характерный масштаб макроскопич. флуктуаций в среде, на к-рых происходит рассеяние. В этом случае элементарный акт рассеяния света единичным объёмом среды описывается в ур-нии (1) сечением рассеяния  $\sigma$ , соответствующим данному типу флуктуаций. Такой подход применим также и к неравновесному рассеянию света на микроскопич. флуктуациях распределения частиц по координатам и импульсам. При этом  $\sigma$  уже соответствует сечению рассеяния света отдельной частицей (когерентному,  $\omega = \omega'$ , или некогерентному комбинационному рассеянию света атомом или молекулой, комптоновскому рассеянию свободным электроном и др.). Общность формализма описания П. и. в указанных случаях базируется на мгновенности процесса рассеяния фотона средой (макроскопич. ансамблем или отдельной частицей), что и позволяет свести описание П. и. к замкнутому ур-нию (1) для интенсивности.

В теории П. и. важен более общий случай негмонотонности рассеяния света в элементарном акте, когда поглощение и рассеяние следует рассматривать раздельно и происходит перераспределение излучения по частоте. Эта область теории П. и. наиболее широко используется в астрофизике [1, 2]. Ур-ние для интенсивности  $I(r, \xi, t)$ , где  $\xi = (\omega, \mu, \mu')$ , принимает вид:

$$\left( c^{-1} \frac{\partial}{\partial t} + \nabla_r \frac{\partial}{\partial r} \right) I = -\kappa(r, \xi, t) I + Q(r, \xi, t), \quad (9)$$

где  $\kappa$  — вероятность поглощения фотона на единице длины пути,  $Q$  — объёмная плотность мощности излучения среды,  $\kappa$ -рая здесь учитывает также и упругое рассеяние света (ф-ция источников), дифференциальная по всем параметрам  $\xi$  фотона ( $\mu$  характеризует поляризация, состояние фотона).

При отсутствии влияния элементарного акта поглощения света на величину  $Q$  (т. е.  $Q$  не зависит от  $I$ ) ур-ние (9) полностью описывает П. и. Это типично, напр., для П. и. электронами плазм. путём тормозного, фоторекомбинац., циклотронного механизмов испускания и поглощения (здесь  $Q$  не зависит от  $I$  при условии малости влияния актов поглощения на ф-цию распределения электронов по импульсам, как правило, равновесную). Если процессы релаксации к равновесию сильны не только для электронов, но и для фотонов (распределение  $k$ -рых тогда близко к распределе-

нию Планка с темп-рой электронов), то при условии малости эфф. длины пробега фотонов по сравнению с характерным размером неоднородности темп-ры ур-ние (9) сводится к простому ур-нию диффузионного типа для темп-ры (лучистая теплопроводность, [3]).

Перенос резонансного излучения. Др. важный случай П. и. относится к резонансному рассеянию света на атомах или молекулах среды. Поглощение резонансного фотона приводит к образованию возбуждённого атома (ВА), к-рый подвергается сложному микроскопич. воздействию среды, тогда как рассеяние нерезонансного фотона атомом соответствует виртуальному (по сути мгновенному) возбуждению атома. В переносе резонансного излучения ф-ция источников  $Q$  определяется в общем случае ф-цией распределения ВА по координатам, импульсам и параметрам  $\xi$  излучаемого в момент времени  $t$  фотона  $f(r, \rho, t)$ :

$$Q = A \omega_0 \int f(r, \rho, \xi, t) d\rho \equiv A \omega_0 N(r, \xi, t), \quad (10)$$

где  $A^{-1}$  — полное (интегральное по  $\xi$ ) время жизни ВА (для простоты двухуровневого) по отношению к радиат. распаду в линии с частотой перехода  $\omega_0$ . Коэф. поглощения  $\kappa$  определяется сечением поглощения резонансного фотона невозбуждённым атомом с импульсом  $\rho$ :

$$\kappa = \int \sigma_{\text{полг}}(\rho, \xi) f_0(r, \rho, t) d\rho, \quad (11)$$

где  $f_0$  — ф-ция распределения невозбуждённых атомов. Ф-ция распределения ВА является решением кинетич. уравнения

$$\begin{aligned} \hat{\delta} f \equiv \left( \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial r} + F \frac{\partial}{\partial p} \right) f = \hat{L} f - A f + q + \\ + \int d\Delta t \int d\xi' \frac{I(r, \xi', t - \Delta t)}{\hbar \omega} \sigma_{\text{раск}}(\xi' \rightarrow \xi, \rho, \Delta t) f_0(r, \rho, t - \Delta t), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $F$  — внеш. сила,  $q$  — внеш. источник ВА,  $\hat{L}$  — оператор, описывающий все процессы взаимодействия ВА с окружающей средой (включая процессы релаксации по  $\rho$  и  $\xi$ , а также девозбуждение ВА столкновениями). Величина  $\sigma_{\text{раск}}$  описывает дифференц. по  $\xi$  и  $\Delta t$  сечение двухступенчатого процесса поглощения отдельным атомом (с импульсом  $\rho$ ) фотона  $\xi'$  и последующего перезлучения фотона  $\xi$  по истечении времени  $\Delta t$  с учётом воздействия на ВА всех микро- и макроскопич. флуктуаций среды. Вероятность указанного процесса, интегральная по  $\Delta t$ , определяет широко используемую в астрофизике [1, 2, 4] ф-цию перераспределения  $R(\xi \rightarrow \xi')$  фотона по его параметрам в акте рассеяния (как правило, по частоте, при соответствующем усреднении по остальным параметрам). Свертка функции  $R$  по начальным или конечным параметрам фотона даёт соответственно контур линии (т. е. плотность вероятности) испускания  $P(\xi')$  и поглощения  $\varepsilon(\xi)$  фотона:

$$\int R(\xi \rightarrow \xi') d\xi = P(\xi'), \quad \int R(\xi \rightarrow \xi') d\xi' = \varepsilon(\xi) \equiv \frac{\kappa(\xi)}{\int \kappa(\xi') d\xi'}.$$

Фактически за перераспределение по частоте отвечают те же механизмы, что и за уширение линии: доплеровский, итарновский и др.

Ур-ние (12) позволяет сформулировать критерий мгновенности элементарного акта рассеяния: его эфф. длительность должна быть мала по сравнению с характерными временами эволюции ф-ции распределения ВА под действием операторов  $\hat{\delta}$  и  $\hat{L}$ . При выполнении этого условия ур-ние (9) с учётом ур-ий (10) и (12) переходит в ур-ние (1).

В том предельном случае, когда реализуется полное «завыание» испущенным фотонами его состояния до поглощения,  $R$  распадается на произведение вероятности поглощения и испускания — т. е. полное перераспределение по частоте (ППЧ). При этом  $N(r, \xi, t) = N(r, t) P(\xi)$ , где  $N(r, t)$  — плотность ВА. Если

можно пренебречь макроскопич. движением среды за характерные времена эволюции движения в данной среде, система ур-ний (9—12) сводится к одному из основополагающих ур-ний теории П. и.— ур-нию Бибермана — Холстейна (1947). В однородной стационарной среде (объёма  $V$ ) оно имеет вид

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -(A + v_T)N + A \int N(r')G(|r-r'|)dr' + q,$$

где  $v_T$  — скорость нерадиационного (прежде всего столкновительного) девозбуждения атома, а ядро  $G$  выражается через вероятность  $T(\rho)$  прохождения фотона пути, не меньшего  $\rho$ , без поглощения:

$$G(\rho) = -\frac{1}{4\pi\rho^2} \frac{\partial T}{\partial \rho}, \quad T(\rho) = \int_{\rho}^{\infty} P(\omega) \exp[-\kappa(\omega)\rho] d\omega.$$

Выведенное первоначально из балансовых соотношений ур-ние Бибермана — Холстейна было впоследствии обосновано в рамках микроскопич. квантового описания эволюции фотонного газа в резонансной атомной среде. Матем. аппарат теории П. и. в приближении ППЧ см. в [1, 2, 5].

ППЧ реализуется как при внеш. микроскопич. воздействиях [следствие описываемых величинами  $\sigma$  и  $Z$  в (12) взаимодействия с др. частицами, приводящего к сбою фазы атомного осциллятора — см. Уширение спектральных линий], так и в результате хаотизации параметров излучаемого фотона независимо от микроскопич. воздействия среды (при доплеровском уширении).

ППЧ соответствует случаю, когда наиб. ярко выражено явление излучения. В этом случае стационарное распределение возбуждённых атомов в конечном объёме определяется вероятностью только прямого, без рассеяния, выхода фотона из среды:

$$N = q/(v_T + A\bar{T}(r)),$$

где  $\bar{T}(r)$  — усреднённая по углам вылета фотона вероятность выхода фотона, испущенного в точке  $r$ , без рассеяния.

Совр. развитие теории переноса резонансного излучения связано с выходом за рамки приближения ППЧ, т. к. практически значим более общий случай — т. и. частичное перераспределение по частоте (см. (12), [6]), имеющий место в астрофиз. объектах, в лабораторной плазме с многоярными ионами, для к-рых возрастает роль механизма спонтанного испускания ( $A \propto \omega^4$ ,  $Z$  — заряд иона) благоприятствует частичному сохранению памяти фотона не только в далёком крыле линии.

Лит.: 1) М. Яхьяев Д., Звездные атмосферы, пер. с англ., ч. 1—М., 1982; 2) Иванов В. В., Перенос излучения и спектры небесных тел, М., 1989; 3) Зельдович Я. В., Ра яев Ю. П., Финна ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, М., 1986; 4) Булышев А. В., Проблемы образования и эволюции звезд, М., 1988; 5) Абрамов Ю. Ю., Дм хан А. М., Н а п р т о в а Л. П., Стационарные задачи теории радиационного переноса возбуждения, М., ИАЭ, reprint 1804, 1989; 6) Махров В. А., Сечин А. Ю., Старостин А. Н., Теория нестационарного переноса резонансного излучения в условиях частичного перераспределения по частотам, ИЖТО, 1990, т. 97, № 3, с. 114; А. В. Кривичев, В. И. Косов.

**ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ** — безызлучательная передача энергии электронного возбуждения при эл.-магн. взаимодействии двух частиц (молекул, ионов, комплексов), находящихся на расстоянии, меньшем длины волны излучения. В результате П. э. молекула — донор энергии переходит в состояние с меньшей энергией, а молекула — акцептор энергии — в состоянии с большей энергией. Взаимодействие частиц, вследствие к-рого происходит П. э., может быть мультипольным (в частности, диполь-дипольным) или обменным. Характерные расстояния, при к-рых осуществляется П. э., достигают при диполь-дипольном взаимодействии 5—6 д.м., при обменном — 1—2 нм. Процессы П. э. отличаются от процессов переноса излучения. Последние

происходят с участием излучат. квантовых переходов: акцептор энергии поглощает фотон, испущенный донором энергии, причём частицы находятся на расстоянии, большем длины волны излучения. Процессы П. э. между одинаковыми молекулами (атомами или ионами), происходящие, как правило, многократно, наа. мирающей энергии.

Условия, необходимые для П. э., реализуются в осн. в конденсир. средах (в газах взаимодействие частиц при их соударении приводит к уширению спектральных линий). П. э. играет существен. роль для процессов люминесценции. Взаимодействие при П. э. обычно предполагается настолько слабым, что спектры поглощения и люминесценции взаимодействующих частиц практически не меняются, т. е. остаются такими же, что и в отсутствие взаимодействия. В соответствии с законом сохранения энергии П. э. происходит только при условии, что спектры поглощения акцептора и спектры люминесценции донора перекрываются, т. е. в условиях резонанса. Если электронные переходы в доноре и акцепторе разрешены правилами отбора, то П. э. происходит в результате диполь-дипольного взаимодействия. Для этого случая теория П. э. была развита Т. Фёрстером (Th. Foerster, 1948). Она рассматривает процесс П. э. между молекулами в *адиабатическом приближении* и предполагает, что после переноса происходит быстрая колебат. релаксация в молекуле акцептора, что обеспечивает необратимость П. э. Скорость П. э. (вероятность переноса в единицу времени) выражается ф-лой

$$W = R_0^6/\tau_D R^6, \quad (1)$$

где  $\tau_D$  — радиац. время жизни донора,  $R$  — расстояние между молекулами,  $R_0$  — т. и. фёрстеровский радиус, т. е. расстояние, на к-ром вероятность переноса  $W$  равна вероятности излучения  $1/\tau_D$ . Величина  $R_0$  связана со степенью перекрывания спектров след. образом:

$$R_0^6 = \frac{9\kappa^2 c^4}{8\pi} \int F_D(\omega) \sigma_A(\omega) n^{-4} \omega^{-4} d\omega, \quad (2)$$

где  $\chi$  зависит от взаимной ориентации дипольных моментов донора и акцептора,  $F_D(\omega)$  — нормированный спектр люминесценции донора [ $\int F_D(\omega) d\omega = 1$ ],  $\sigma_A$  — эфф. сечение поглощения акцептора,  $n$  — показатель преломления среды,  $\omega$  — круговая частота излучения люминесценции. Если ориентации донора и акцептора не коррелированы, то ср. квадратичное значение  $\chi^2 = 2/3$ .

Влияние П. э. на характеристики люминесценции можно определить, проведя усреднение по разл. положениям акцепторов относительно доноров в среде. Для случая, когда молекулы донора и акцептора неподвижны в течение всего времени возбуждённого состояния, такое усреднение даёт след. результат: затухание люминесценции донора после импульсного возбуждения происходит по закону (фёрстеровское затухание)

$$\rho(t) = \exp(-t/\tau_D - 2q\sqrt{t/\tau_D}), \quad (3)$$

где  $q = (\pi^{1/2}/2)(c_A/c_0)$ ,  $c_A$  — концентрация молекул акцептора,  $c_0 = (4\pi/3)^{-1}R^3$  — т. и. критич. концентрация для данной пары донор — акцептор. Ф-ла (3) справедлива, если концентрация акцепторов достаточно мала:  $c_A R \ll 1$ , где  $v$  — объём молекулы акцептора.

В жидк. растворах на П. э. оказывает влияние диффузия молекул, к-рая приводит к сближению молекул донора и акцептора и ускоряет П. э. При этом закон затухания (3) на далёких стадиях префизит в экспоненциальный, зависящий от коэф. диффузии  $D$  («закон  $D^{1/2}$ »):

$$\rho(t) = \exp\left\{-\frac{t}{\tau_D} - 0,68 \cdot 4\pi(D\tau_D)^{1/2} c_A^{1/2} c_0 \frac{t}{\tau_D}\right\}.$$

Диполь-дипольный механизм П. э. осуществляется в жидких и твердых растворах органич. веществ типа красителей. Им объясняются мн. случаи тушения и сенсибилизации люминесценции, а также контрагг. деполаризации люминесценции (см. *Поляр化的な люминесценция*). П. э. играет большую роль в фотосинтезе, обеспечивая передачу энергии возбуждения молекулы хлорофилла к реакц. центрам.

П. э. при облучении взаимодействии наблюдается, когда электронные переходы в акцепторе запрещены. Этим видом П. э. объясняется сенсибилизиров. фосфоресценция (см. *Кооперативная люминесценция*) органич. соединений при взаимодействии молекулы донора в триплетном состоянии с молекулой акцептора в осн. состоянии и переходе молекулы акцептора в триплетное состояние (триплет-триплетный П. э.). При этом зависимость выхода люминесценции донора  $I_D$  от концентрации акцептора  $c_A$  может быть выражена ф-лой Перрена:

$$I_D = I_{D0} \exp(-\alpha c_A),$$

где  $\alpha$  характеризует объем, охваченный процессами тушения. П. э. от органич. молекул в триплетном состоянии к молекуле кислорода приводит к *тушению люминесценции*, а также к образованию кислорода в синглетном состоянии.

П. э. в кристаллах и стеклах имеет большое значение в лазерных материалах с редкоземельными и переходными ионами. В этом случае П. э. обуславливает самотушение при увеличении концентрации активатора. Механизм самотушения обычно связан с миграцией энергии по ионам активатора, что ускоряет передачу к тушащей примеси, роль к-рой может играть и сам активатор в виде близкорасположенной пары ионов. Теория самотушения показывает, что в этом случае для описания миграции энергии и П. э. к примеси обычно неприменимо диффузионное приближение, а необходимо др. модели («прыжковое тушение»). П. э. используется также для повышения эффективности лазерных материалов, как и др. люминофоров, путём сенсибилизации.

Сравнительно большое  $\tau_D$  для редкоземельных ионов дало возможность детально изучить кинетику П. э. в системах, содержащих такие ионы. При этом удалось выделить раад. стадии П. э., в т. ч. фёрстеровскую (статическую стадию), когда миграция по одноименным ионам ещё не играет роли, и миграционно-ускоренную, дающую закон затухания доноров, близкий к экспоненциальному.

Процессы П. э. в молекулярных кристаллах с примесями обуславливают эфф. люминесценцию примесных молекул при возбуждении в осн. веществе. В этом случае П. э. объясняется миграцией экситонов, к-рую обычно можно описать как диффузию экситонов. В типичных случаях (напр., для кристалла антрацена) коэф. диффузии имеет порядок величины  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  см<sup>2</sup> с<sup>-1</sup> при комнатной тем-ре и увеличивается при понижении тем-ры (см. *Экситон*).

Лит.: Беззлучательный перенос энергии электронного возбуждения, Д., 1977; Агранович В. М., Галакин И. и М. Д., Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах, М., 1978; В у р р и т е в а. И., Концентрационное тушение неэнергетич. возбуждений в растворах, «УФН», 1984, т. 143, с. 553. М. Д. Галакин.

**ПЕРЕНОСА ПРОЦЕССЫ** в плазме — неравновесные процессы, приводящие к установившемуся пространственному распределению параметров плазмы — концентрации, среднескоростной скорости и парциальных тем-р электронов и тяжёлых частиц. В отличие от тем-р нейтральных частиц, П. п. в плазме зависит от напряжённостей собственных самосогласованных электрич.  $E$  и магн.  $B$  полей, к-рые определяются токами и объёмными зарядами частиц плазмы. Поэтому П. п. в плазме в общем случае описываются системой ур-ний переноса частиц, импульса и энергии и ур-ний Максвелла.

В гидродинамич. приближении, когда смещения частиц между столкновениями (в отсутствие магн. поля — длина свободного пробега  $\lambda$ ) меньше характерных масштабов неоднородности плазмы  $L$ , а характерные частоты не превосходят частот столкновений  $\nu$ , классические (столкновительные) П. п. описываются матрицей коэф. переноса. Она линейно связывает потоки частиц, импульса и энергии с факторами, нарушающими термодинамич. равновесие, — градиентами парциальных концентраций и тем-р, неоднородностью скорости, электрич. полем (см. *Переноса явления*). Вследствие большого различия между массами электронов и тяжёлых частиц (ионов и нейтральных молекул) тем-ры их, вообще говоря, различны, поэтому перенос энергии лёгкой в тяжёлой компонентой рассматривают отдельно. Напр., в отсутствие магн. поля  $V$  поток тем-ры  $q_n$ , обусловленный температурным градиентом  $\nabla T_n$  к.-л. компоненты  $n$ , есть  $q_n = -c_{en} \chi_n \nabla T_n$ , где  $c_{en}$  — уд. теплоёмкость при пост. объёме,  $\chi_n$  — коэф. температуропроводности. Парциальный тензор плотности потока импульса  $\hat{p}_n = -\eta_n \hat{W}_n$ , где тензор скорости сдвигов

$$W_{ik} = \frac{\partial u_{ik}}{\partial x_k} + \frac{\partial u_{ki}}{\partial x_i} - \frac{1}{3} \delta_{ik} \operatorname{div} u.$$

При  $V = 0$  оценки для коэф. температуропроводности  $\chi_n$  и кинематич. вязкости  $\eta_n/m_e n_n$  в плазме такие же, как и в нейтральных газах:  $\chi_n \sim \eta_n/m_e n_n \sim \lambda_n^2 \nu_n$ , где  $n_n$  — концентрация,  $m_e$  — масса частиц компоненты  $n$ . Перенос частиц в плазме обусловлен градиентами концентрации (диффузия), тем-ры (термодиффузия) и электрич. полем.

П. п. в слабоионизованной плазме без магнитного поля. В слабоионизов. плазме, а также в полупроводниках и слабых электролитах имеется выделенная система осчёта, связанная с нейтральной компонентой (в полупроводниках — с решёткой). Если столкновения заряд. частиц между собой несущественны, то потоки частиц определяются трением их о нейтральный газ и равны в этой системе:

$$\Gamma_n = n_n u_n = -D_n \nabla n_n - D_n^{(T)} n_n \nabla \ln T_n \pm b_n n_n E,$$

где  $D_n$ ,  $D_n^{(T)}$  — коэф. диффузии, термодиффузии,  $b_n$  — *подвижность*; при этом  $D_n \sim D_n^{(T)} \sim \chi_n$ . Эти коэф. связаны с тем-рой и зарядом частицы  $Z_n$  соотношением Эйнштейна:  $D_n = T_n b_n / |Z_n|$ . Суммарная проводимость плазмы  $\sigma = \sum_n |Z_n| n_n b_n$ .

Неоднородность плазмы создаёт самосогласованное неоднородное электрич. поле, к-рое при медленных процессах определяется условием *квазинейтральности плазмы*  $\sum_n Z_n n_n \approx 0$  и является потенциальным. Простейшим примером влияния самосогласованного электрич. поля на П. п. является *амбиполярная диффузия* в простой ( $n_e = n_i = n$ ) слабоионизов. плазме при  $T_e = T = T_i$  const, к-рая описывается ур-нием

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \nabla(D_A \nabla n) = I,$$

где  $I$  соответствует рождению и рекомбинации частиц, а коэф. амбиполярной диффузии

$$D_A = \frac{D_e b_i + D_i b_e}{b_e + b_i} \approx D_i \left(1 + \frac{T_e}{T_i}\right)$$

определяется назм. подвижными частицами (ионами). Электрич. поле тормозит электроны и приводит к совместной диффузии электронов и ионов, потоки к-рых  $\Gamma_e$ ,  $\Gamma_i$  в одномерном случае отлагаются на пост. вектор, т. е. плотность тока  $j = \text{const}$ . При  $I = 0$  характерное диффузионное время жизни неоднородности  $\tau_A = L^2/D_A$ , где  $L$  — характерный размер неоднородности. Эта ситуация является вырожденной: ур-ние не содержит

явно электрич. поля и не зависит от тока, протекающего через неоднородную плазму.

Диффузия в плазме с ионами разных сортов даже при  $j = 0$  не сводится к амбиполярной, т. к. электрич. поле оказывается пропорциональным градиентам всех парциальных концентраций. При этом кер-вые потоки частиц могут быть направлены в сторону возрастания их концентрации. В многокомпонентной плазме или в случае, когда подвижности зависят от электрич. поля, протекание пост. тока приводит к движению неоднородностей со скоростью амбиполярного дрейфа  $V$ . В плазме, содержащей  $k$  сортов заряд. частиц с пост. подвижностями, имеется  $(k-2)$  разл. значений скорости амбиполярного дрейфа, соответствующих разным типам сигналов. Напр., если имеются ионы двух сортов ( $i_1, i_2$ ) с подвижностями  $b_{i_1} \gg b_{i_2}$ , то при  $n_{i_2} = \text{const}$  скорость амбиполярного дрейфа

$$v_a = \frac{j_0 n_{i_1}}{e b_{i_1} (n_{i_1} + n_{i_2})}. \quad (*)$$

В простой газоразрядной плазме обычно существенна зависимость подвижности электронов от электрич. поля  $b_e(E)$ . При этом  $v_a = E b_e / (1 + b_e)$ , где  $b_e = -\partial(\ln b_e) / \partial(\ln E)$ . Скорость амбиполярного дрейфа  $v_a$  характеризует распространение квазинейтральных возмущений концентрации (волн плотности) плазмы. Большие возмущения (как волны большой амплитуды) из-за нелинейной связи между концентрациями и скоростями потоков (\*) деформируются и опрокидываются. Возникают области с резкими градиентами концентрации — скачки, аналогичные ударным волнам, — где существенна диффузия или нарушается квазинейтральность. Если же масштаб неоднородностей  $L \ll T/(eE)$ , то эволюция их и при наличии тока определяется лишь диффузией.

П. п. в слабоионизованной плазме в магнитном поле. Т. к. смещение заряд. частиц поперёк магн. поля  $V$  уменьшается с ростом  $B$  до коэф. переноса являющихся тензорами: вдоль  $B$  их компоненты такие же, как и при  $B = 0$ , а поперёк — малы. При  $\omega_c / \nu_a \gg 1$  ( $\omega_c = -|Z_e| B / m_e c$  — циклотронная частота) в слабоионизов. плазме поперечные диагональные элементы тензоров диффузии имеют вид

$$D_{\alpha 1} = \frac{T_{\alpha 0} b_{\alpha 1}}{|Z_{\alpha}|} \sim D_{\alpha 1}^{(T)} \sim \chi_{\alpha 1} \sim \rho_{\alpha}^2 \nu_a$$

( $\rho_{\alpha} = \sqrt{2 T_{\alpha 0} / m_{\alpha} \omega_c}$  — ларморовский радиус). В сильном магн. поле  $D_{e1} \ll D_{e1}$ , тогда как  $D_{e1} \gg D_{i1}$ . Нендиagonalные (холловские) компоненты тензоров подвижности в этих же условиях ( $\omega_c / \nu_a \gg 1$ ) соответствуют дрейфу в скрещенных полях:

$$b_{\lambda} = b_{\lambda} \frac{c}{B}; \quad D_{\lambda} = \frac{T_{\alpha 0} b_{\alpha 1}}{|Z_{\alpha}|} \sim D_{\lambda}^{(T)} \sim \chi_{\lambda} \sim \frac{c T_{\alpha 0}}{B |Z_{\alpha}|}$$

Даже в простой слабоионизов. плазме в магн. поле перенос частиц не сводится к амбиполярной диффузии. Для ее реализации был бы необходим электрич. потенциал, тормозящий во всех направлениях наиб. подвижные частицы (электроны — вдоль  $B$ ; ионы — поперёк  $B$ ). Такой потенциал, как правило, не удовлетворяет граничным условиям и может реализоваться лишь в исключит. случаях. Поэтому и у-ние амбиполярной диффузии описывает лишь одномерную эволюцию поперёк  $B$ , а также эволюцию профилей вдоль  $n(r, z) = n_1(r) n_2(z)$  ( $z$  — координата вдоль  $B$ ,  $r$  — поперёк  $B$ ) в диалектрич. баллоне или в неограниченной плазме (в последнем случае такой профиль реализуется лишь при очень сильном превышении возмущенной концентрации над фоновой). Характерное диффузионное время жизни при этом

$$\tau_A^{-1} = D_{i1} \frac{1 + T_e T_i}{L^2} + D_{e1} \frac{1 + T_e T_e}{L_1^2}$$

где  $L, L_1$  — размеры неоднородности вдоль и поперёк  $B$ . В общем случае условие квазинейтральности требует равенства  $\text{div} \Gamma_e = \text{div} \Gamma_i$  и по плазме протекает вихревой ток. Тогда эволюция может определяться не наименьшими, а наибольшими коэф. диффузии по каждому направлению. Такой режим «короткого замыкания» наблюдается при диффузии плазмы, ограниченной металл. стенками. При этом электроны уходят из плазмы вдоль  $B$ , ионы — поперёк  $B$ , и по плазме протекает ток, к-рый замыкается через проводящие стенки камеры. Характерное время такой диффузии

$$\tau^{-1} \sim \frac{D_{e1}}{L^2} + \frac{D_{i1}}{L_1^2}$$

может быть в парядки меньше амбиполярного. В неограниченной плазме возмущение еко концентрации приводит к появлению вихревого тока, к-рый определяет диффузионную эволюцию неоднородности. На рис. 1 приведены поверхности пост. концентрации при диффузии малого (точечного) возмущения в однородной неограниченной плазме. Характерные размеры возмущенной области вдоль и поперёк  $B$  определяются наиб. подвижными в каждом направлении частицами и равны соответственно

$$L_0 = \sqrt{D_{e1} \left(1 + \frac{T_i}{T_e}\right) t};$$

$$L_1 = \sqrt{D_{i1} \left(1 + \frac{T_e}{T_i}\right) t}.$$

Для выбранного на рис. 1 примера отношение  $L_1 / L_0$  равно 10. Поляризация электрич. поле вызывает протекание электронного и ионного токов по фоновой плазме, поддерживающая ионную квазинейтральность и

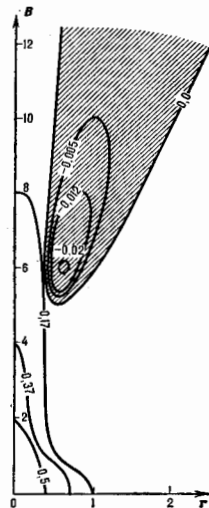


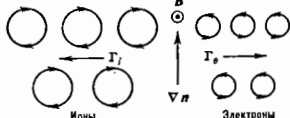
Рис. 1. Линии равной концентрации при диффузии точечного возмущения в однородной неограниченной плазме. Размеры области возмущения вдоль поля в 10 раз больше области возмущения поперёк поля.

формирующих область с пониж. концентрацией плазмы (защтрихована на рис. 1). Скорость амбиполярного дрейфа в магн. поле отлична от нуля даже в простой слабоионизов. плазме. Поэтому при протекании внеш. тока через неоднородность эволюция ее сопровождается движением и нелинейной деформацией профиля, образованием скачков и разделением неоднородности на движущиеся с разной скоростью сгустки плазмы.

П. п. в полностью ионизованной плазме в однородном магнитном поле. Неоднородная плазма разделяется вдоль  $B$  со скоростью ионно-звуковых волн  $\sim \sqrt{(T_e + T_i) / m_i}$ , поэтому не существует диффузии в продольной, полностью ионизованной плазме вдоль  $B$ , реализуется только диффузия поперёк поля, определяемая электронами  $D_{11} = D_{e1} = D_{i1} - \rho^2 \nu_{ei}$ . Подвижности компонент также отсутствуют — определена только суммарная проводимость. Оценки для температуропроводности также же, как и в слабоионизов. плазме, т. е.  $\chi_{e1} \sim \sqrt{m_i / m_e} \chi_{i1}$  при  $T_e \sim T_i$ . В сильном магн. поле

поперечное к  $\mathbf{B}$  электрич. поле с точностью до  $(\rho_i/L)^2$  не приводит к току, а вызывает дрейф всей плазмы в целом со скоростью  $c[EB]/B^2$  (см. Дрейф заряженных частиц). В полностью ионизованной плазме имеются также т. в. косые (описываемые недиагональными элементами  $D_{ij}$ ) потоки зарядов поперек  $\mathbf{B}$  (рис. 2);  $\mathbf{V}_\perp = c\mathbf{B}\nabla(\ln T_\perp)/ZB^2$ . В прямом однородном магн. поле их дивергенция равна нулю ( $\text{div}\mathbf{V}_\perp = 0$ ), т. к.

Рис. 2. Потоки частиц в неоднородной плазме поперек магнитного поля.



они не связаны с перемещением ведущих центров ларморовских орбит, а обусловлены неполной компенсацией потоков электронов и ионов из-за неоднородного распределения их орбит. В неоднородном магн. поле  $\text{div}\mathbf{V}_\perp \neq 0$  из-за дрейфа ведущих центров связанного с неоднородностью и кривизной магн. поля.

«Косые» потоки электронов и ионов, проявляющиеся как диамагн. ток, приводят к появлению сил трения электронов об ионы  $\mathbf{R} = m_e v_{ei} (\mathbf{V}_\perp - \mathbf{V}_i)$ . Дрейфовое движение электронов и ионов поперек  $\mathbf{B}$  под действием этой силы происходит совместно в направлении против  $\nabla n$  со скоростью  $\sim c[BR]/e^2 B^2 n$  и проявляется как амбиполярная диффузия с коэф.  $D_{\perp 1} \sim \rho_i^2 v_{ei}$ . Того же порядка поперечные диагональные коэф. термодиффузии  $D_{\perp 1}^{(T)} = D_{\perp 1}^{(T)} \sim \rho_i^2 v_{ei}$ . Перенос ионов примеси происходит значительно быстрее, т. к. он обусловлен ионно-ионными столкновениями и не связан с переносом электронов. Даже при однородной темп-ре он не сводится к диффузии, поскольку поток примеси содержит слабеющие, пропорц. к градиенту её концентрации, так и градиенту концентрации осн. компоненты.

Перенос ионущая (вязкость) в полностью ионизованной плазме определяется ионами. Тензор вязкости  $\eta_{ii}$  в магн. поле имеет элементы, пропорц. ларморовскому радиусу  $\rho_i$ ,  $\rho_i^2$  и  $\lambda_i$ :  $\sim n m_i^2 v_{ii}^2$ ,  $\sim n m_i^2 v_{ii}^2 v_{ii}$  и  $\sim n m_i^2 v_{ii}^2 v_{ii}$ . Вязкость и инерция ионов приводит к дополнительному по сравнению с диффузионным потоку ионов. Условие обращения его в нуль определяет поперечное к  $\mathbf{B}$  амбилярное электрич. поле.

Перенос тепла не связан условием квазинейтральности и происходит, вообще говоря, быстрее, чем перенос частиц. Напр., поперечная (диагональная) теплопроводность полностью ионизованной плазмы определяется ионами: коэф. температуропроводности

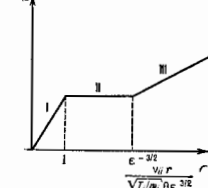
$$\chi_{ii} \sim \rho_i^2 v_{ii} \sim \sqrt{m_i/m_e} \chi_{ei} \gg D_{\perp 1} \sim \chi_{e\perp}$$

Классич. описание П. п. возможно при очень малом смещении частиц между столкновениями (малой длине свободного пробега). В полностью ионизованной плазме, где сечения столкновений дают с ростом скорости, для описания быстрых электронов, у к-рых длина пробега велика, необходим кинетич. подход, учитывающий, что электроны, ускоряемые электрич. полем между столкновениями, могут приобрести такую скорость, что они уже перестают формироваться за счёт столкновений. С др. стороны, даже в слабостолкновит. плазме с достаточно плавными ф-циями распределения, к-рые можно характеризовать анизотропными темп-рами, потоки проницаемые градиентам макроскопич. параметров, что даёт возможность построить замкнутую систему ур-ний переноса.

Неоклассические П. п. в неоднородном магнитном поле. Все диагональные коэф. переноса поперек  $\mathbf{B}$  складуют с ростом  $\mathbf{B}$  как  $B^{-2}$ . На этом основано удержание плазмы в магнитных ловушках. Однако из-за кри-

воильности и неоднородности магн. поля П. п. в них оказываются сложные. Дрейфы заряд. частиц в неоднородном магн. поле приводят к поляризации плазмы и к течению её в скрещенных электрич. и магн. полях. Поэтому П. п. поперек магн. поверхностей в гидродинамич. приближении, напр., носит характер своеобразной коллекции. В этом режиме эфф. неоклассич. коэф. температуропроводности (рис. 3, III) и диффузии в токамаке в  $(\epsilon/\theta)^2$  раз больше, чем в прямом цилиндре ( $\epsilon = r/R$  — отношение радиусов

Рис. 3. Зависимость неоклассической ионной температуропроводности от частоты столкновений в токамаке: I — режим редких столкновений («банановый»); II — режим плаги; III — гидродинамический режим.



магн. поверхности,  $\theta$  — отношение пологой и торoidalной магн. полей). В режиме редких столкновений (рис. 3, I) смещение частиц поперек  $\mathbf{B}$  между столкновениями может немного превышать ларморовский радиус. При этом осн. вклад в радиальный неоклассич. перенос дают частицы с малыми продольными скоростями, запертые из-за неоднородности поля  $\mathbf{B}$  на внеш. обводе тора. Проекция их траекторий на плоскость малого сечения тора имеют вид бананов шириной  $b_\perp \sim \rho_i \sqrt{\epsilon/\theta} \gg \rho_i$ . При столкновении такие частицы смещаются на большое расстояние (порядка  $b_\perp$ ) и эфф. частота столкновений для них высока, поэтому, несмотря на малочисленность, именно они определяют П. п.:  $\chi_{ii} \sim \rho_i^2 v_{ii} \sqrt{\epsilon/\theta^2} \sim \sqrt{m_i/m_e} \chi_{ei}$ . Диффузия автоматически амбилярная;  $D_{\perp 1} \sim \chi_{e\perp}$ . В промежуточном режиме (плато II на рис. 3) коэф. переноса тоже определяются частицами с малыми продольными скоростями и не зависят от частоты столкновений. Неоклассич. П. п. существуют также в др. магн. ловушках — *стеллараторах, открытых ловушках*.

Аномальные П. п. Применительно представлений о классических (столкновительных) П. п. ограничена тем, что в неоднородной плазме, особенно в магн. поле, возможны многочисленные, неустойчивости. В результате их развития плазма может перейти в турбулентное состояние. Возникающие при этом хаотич. электрич. и магн. поля в ряде случаев приводят к аномальным П. п., на порядки превышающим классические. Макроскопич. потоки частиц, импульса и энергии при этом определяются не только средними полями и профилями, но и установившимися уровнем и спектром колебаний. Аномальную диффузию частиц сравнивают с *Ваза диффузией*, к-рая наблюдалась в газовых разрядах. Перенос частиц и электрич. теплоперенос в токамаках также аномальны и значительно превышают неоклассич. значения, но оказываются меньше боровских. Как правило, не удаётся построить замкнутую систему ур-ний, описывающую аномальные П. п.; результаты в осн. сводятся к полноточности оценкам. Исключение составляет случай слабой турбулентности, когда в квазинейтральной приближении удаётся описать аномальные П. п. Построение общей количеств. теории аномальных П. п. является одной из наб. актуальных задач физики плазмы.

Лит.: Галеев А. А., Сагдеев Р. З., «Неоклассическая теория диффузии, в сб. Вопросы теории плазмы, в. 7, М., 1973; Хинтон Ф., Явления переноса в столкновительной плазме, пер. с англ., в кн.: Основы физики плазмы, т. 1, М., 1983; Хортон В., Дрейфовая турбулентность и аномальный перенос, пер. с англ., в кн.: Основы физики плазмы, т. 2, М., 1984; Ораевский В. Н., Коляков Ю. В., Хазанов Г. В., Процессы переноса в анизотропной оклоновой плазме, М., 1985; Рожанский В. А., Пендлин Л. Д., Столкновительный перенос в частично ионизованной плазме, М., 1988.

В. А. Рожанский, Л. Д. Пендлин.



**ПЕРЕНОСА ЯВЛЕНИЯ** — неравновесные процессы, в результате к-рых в физ. системе происходит пространственный перенос элктрич. заряда, вещества, импульса, энергии, энтропии или к-л. др. физ. величин. Общую феноменологич. теорию П. я., применимую к любой системе (газообразной, жидкой или твёрдой), даёт *термодинамика неравновесных процессов*. Более детально П. я. изучает *кинетика физическая*. П. я. в газах рассматриваются на основе *кинетической теории газов* с помощью *кинетического уравнения Больцмана* для ф-ции распределения молекул; П. я. в металлах — на основе кинетик. ур-ния для электронов в металле; перенос энергии в непроводящих кристаллах — с помощью кинетик. ур-ния для *фононов* кристаллич. решётки. Общая теория П. я. развивается в *неравновесной статистич. механике* на основе *Ливелля уравнения* для ф-ции распределения всех частей, из к-рых состоит система (см. *Грина — Кубо формулы*).

П. я. — возмущения, нарушающие состояние термодинамич. равновесия: действие внеш. элктрич. поля, наличие пространств. неоднородностей состава, темп-ры или ср. скорости движения частиц системы. Перенос физ. величины происходит в направлении, обратном её градиенту, в результате чего изолированная от внеш. воздействий система приближается к состоянию термодинамич. равновесия. Если внеш. воздействия поддерживаются постоянными, П. я. протекает стационарно.

П. я. характеризуются необратимыми потоками  $J_i$  физ. величины, напр. диффузионным потоком вещества, тепловым потоком или тензором потока импульса, связанного с градиентами скоростей. При малых отклонениях системы от термодинамич. равновесия потоки линейно зависят от термодинамич. сил  $X_k$ , вызывающих отклонение от термодинамич. равновесия, и описываются феноменологич. ур-ниями

$$J_i = \sum_k L_{ik} X_k,$$

где  $L_{ik}$  — феноменологич. коэф. переноса (в термодинамике неравновесных процессов) или *кинетические коэффициенты* (в физ. кинетике), вычисляемые с помощью решения кинетич. ур-ний. Термодинамич. силы  $X_k$  вызывают необратимые потоки; напр. градиент темп-ры вызывает поток теплоты (*теплопроводность*), градиент концентрации вещества — поток компонента смеси (*диффузия*), градиент массовой скорости — поток импульса (вязкое течение; см. *Вязкость*).

Перенос вещества, вызванный градиентом темп-ры, — *термодиффузия* и обратный ей процесс переноса тепла вследствие градиента концентрации (*Дюбуа эффект*) называют *перекрёстными процессами*. Для перекрёстных процессов в отсутствии магн. поля имеет место соотношение симметрии  $L_{ik} = L_{ki}$  (*Онсагера теорема*), являющееся следствием микроскопич. обратимости ур-ний, описывающих движение частиц. Если магн. поле отлично от нуля, то при замене  $i \rightarrow k$  нужно изменить направление магн. поля на противоположное.

П. я. обычно сопровождаются производством энтропии  $\sigma(t)$  в единицу времени:

$$\sigma(t) = \sum_i J_i X_i = \sum_{ik} X_i L_{ik} X_k.$$

Это выражение является формулировкой *второго начала термодинамики* для П. я. В случае стационарных систем П. я. все образующаяся энтропия отводится из системы.

Плотности потоков, кроме диссипативных частей, пропорциональных термодинамич. силам и связанным с производством энтропии, могут содержать недиссипативные части, к-рые соответствуют конвект. переносу физ. величин с гидродинамич. скоростью  $v(x,t)$ . Локальная плотность энтропии  $S(x,t)$  тоже переносится с гидродинамич. скоростью, так что производство энтропии происходит в элементе жидкости, движущейся

с гидродинамич. скоростью. Поэтому  $S(x,t)$  удовлетворяет ур-нию баланса:

$$\frac{\partial S(x,t)}{\partial t} - \operatorname{div} v(x,t) S(x,t) = \sigma(x,t),$$

где  $\sigma(x,t)$  — плотность производства энтропии, связанная с пронаодством энтропии:  $\sigma(t) = \int \sigma(x,t) dx$ .

П. я. происходит не только в однородных системах, внутри к-рых отсутствуют поверхности раздела, но и в гетерогенных системах, состоящих из однородных подсистем, отделённых друг от друга или естеств. поверхностями раздела (таких, как жидкость и её пар), или полупроницаемыми мембранами. При возникновении в гетерогенной системе разности элктрич. потенциалов, перепада давлений компонент, темп-ры и т. д. между подсистемами возникают необратимые потоки заряда, компонент вещества, теплоты и т. п. Эти потоки связаны с термодинамич. силами линейными соотношениями, и П. я. в гетерогенных системах также сопровождаются производством энтропии. К подобным П. я. относятся электрокинетические явления — перенос заряда и вещества вследствие перепада элктрич. потенциала и давления (в частности, *фильтрация*), *термомеханические эффекты* — перенос теплоты и массы в результате перепада темп-ры и давления в *емли жидком*.

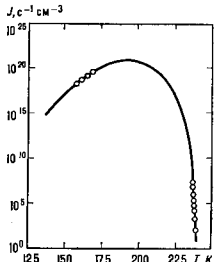
К П. я. относятся также *перенос энергии* электронного возбуждения от возбуждённых атомов к невозбуждённым в веществе и *перенос излучения* в среде при наличии процессов испускания, поглощения и рассеяния. Рассеяние и разможеение нейтронов являются примером П. я., к-рый изучается на основе кинетик. ур-ния для нейтронов с учётом ядерных взаимодействий со средой. Интенсивно развивается теория П. я. на основе неравновесной статистической механики.

Лит. см. при ст. *Термодинамика неравновесных процессов*, *Кинетика физическая*.

**ПЕРЕНОСНОЕ ДВИЖЕНИЕ** в механике — движение подвижной системы отсчёта по отношению к системе отсчёта, принятой за основную (условно считаемую неподвижной). См. *Относительное движение*.

**ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЕ** — охлаждение вещества ниже темп-ры равновесного перехода в др. агрегатное состояние (фазу); частный случай перехода системы в *метастабильное состояние*. В последовательности *фазовых переходов* от высокотемпературных к низкотемпературным фазам (пар → жидкость → кристалл I → кристалл II) возможно П. каждой фазы по отношению к последующей. П. необходимо, чтобы фазовый переход 1-го рода происходил с конечной скоростью. Большое П. однородной системы может быть обусловлено отсутствием зародышей конкурирующей фазы или очень медленным их ростом вследствие малой подвижности молекулы.

Для металлич. капель наблюдались следующие П.  $\Delta T = T_0 - T$ , где  $T_0$  — равновесная темп-ра кристаллизации: 52K(Hg), 122K(Sn), 296K(Ge), 277K(Cu). Устойчивость переохлаждённой фазы характеризуется частотой зародышеобразования



вatem убывает. Такое поведение  $J(T)$  характерно и для др. кристаллизующихся веществ. Аморфная вода при  $T < 135\text{ К}$  находится в застеклованном (внутренне неравновесном) состоянии.

Замедление процессов образования и роста зародышей (см. *Кинетика фазовых переходов*) при П. используются в производстве стекла, аморфных металлов, при закалке сталей и др. сплавов. П. водяного пара и капель воды влияет на характер атм. осадков.

Лит.: С и р и о в В. П., К о в е р д а В. П., *Смешанная кристаллизация переохлажденных жидкостей*, М., 1984.

В. П. Скрипов.

**ПЕРЕСЕЧЕНИЕ УРОВНЕЙ** — одно из явлений *интерференции состояний*, возникающее при воздействии на квантовую систему (атом, молекулу) внеш. магн. поля, к-рое приводит к совпадению энергий (вырождению) состояний, отличающихся проекциями угла. момента на одну или две единицы  $\hbar$ . В области вырождения наблюдаются особенности в поляризации рассеиваемого системой резонансного излучения, к-рые позволяют определять точку пересечения уровней энергии (как ф-цию напряженности магн. поля) и полусумму их ширин. Эффект, возникающий при наличии взаимодействия уровней (смешивания) состояния в области их макс. сближения), наз. антипересечение *и м. у. р. о. в. е. н. и.*; вырождения в этом случае не наступает.

Е. Б. Алексеев, **ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ** магнитных полей в плазме — физ. процесс, связанный с высвобождением запасов магн. энергии, накапливаемой в разл. плазменных конфигурациях, и её преобразованием в кинетич. и тепловую энергию плазмы. Часть энергии, выделяемой при П., может передаваться небольшой группе частиц, ускоряемых при этом до очень высоких (иногда ультррелятивистских) энергий. При П. обязательно изменяется топология магн. поля — возникают новые магн. структуры: петли магн. линий, магн. острова, нейтральные точки и нейтральные линии магн. поля, течения плазмы. Процесс П. играет важную роль во мн. физ. явлениях, происходящих в космосе, и термоядерной плазме.

Перестройка топологии магн. поля, происходящая при П., связана с нарушением замороженности магн. силовых линий в плазму. Условие замороженности магн. поля в плазму записывается как равенство нулю электрич. поля, индуцируемого движением со скоростью  $v$  идеально проводящей среды:

$$E + \frac{1}{c} [vB] = 0 \quad (\text{см. Вмороженность магнитного поля}).$$

В рамках магн. гидродинамики с использованием закона Ома, связывающего величину тока  $j$  с величиной электрич. поля  $E$ , в движущейся системе координат

$$E + \frac{1}{c} [vB] = \frac{1}{\sigma} j + \frac{m_e}{ne} \frac{dj}{dt}, \quad (1)$$

нарушение замороженности означает наличие в (1) справа не равных нулю членов. Если не равен нулю первый член вследствие конечной (а не бесконечной) проводимости  $\sigma$  плазмы, возникает т. н. резистивный механизм П. Второй, инерционный, механизм П. обусловлен конечностью массы  $m_e$  носителей тока — электронов. Анализ процесса П. с помощью кинетич. теории позволяет добавить к этим двум механизмам третий, связанный с беспотенциальн. резонансным процессом — *Ландау затуханием*. Возможны и модификации этих трёх механизмов, напр. аномальное сопротивление, возникающее при рассеянии электронов на разл. микроустойчивостях, к-рые могут возбуждаться в плазме.

При МГД-подходе на основе указанных выше механизмов явление П. можно рассматривать или как вынужденный, или как спонтанный процесс.

В моделях вынужденного П. (модель Паркера — Свита, модель Петчека) изучаются течения плазмы под действием приложенного к ней внеш. электрич. поля  $E_0$ . Магн. поле  $B_0$  на границах системы, показанной на рис. 1, прил. антипараллельны, поэтому

в ней существует особая линия, наз. нейтральной (или нулевой), перпендикулярная плоскости рис. 1, на к-рой магн. поле обращается в нуль или имеет компоненту только вдоль указанной линии. Под действием электрич. поля плазма вместе с силовыми линиями магн. поля дрейфует со скоростью  $u$  (см. *Дрейф заряженных частиц*) к нейтральной линии, где происходит разрыв

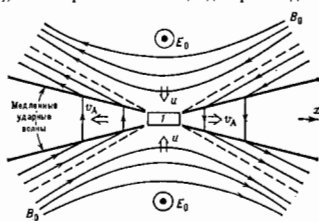


Рис. 1. Модель вынужденного пересоединения, предложенная Х. Петчеком. Пересоединение силовых линий осуществляется в малой диффузионной области  $\delta$ .

магн. силовых линий и соединение их уже в новой комбинации. Перестройка поля должна уменьшить общую длину силовых линий, а значит, и энергию поля, уменьшается и плотность тока в нейтральной линии. Пересоединившиеся силовые линии выносятся из области П. (цифра 1 на рис. 1) вместе с плазмой, ускоренной до скоростей порядка альевновской  $v_A = B_0/\sqrt{4\pi M_i}$  ( $M_i$  — плотность плазмы).

Скорость П. силовых линий характеризуется безразмерной величиной (числом Маха):

$$M = \frac{u}{v_A}, \quad \text{где } u = \frac{E_0}{B_0}. \quad (2)$$

Исследование МГД-моделей показало, что темп П. слабо зависит от конкретных механизмов П., а определяется гл. обр. граничными условиями, т. е. способом организации течения плазмы к области П. По модели Паркера — Свита процесс диссипации магн. поля осуществляется лишь в малой диффузионной области  $\delta$  (рис. 1) в окрестности нейтральной линии, где annihilуется лишь небольшое кол-во магн. энергии; темп П. в этом случае  $M = Re_m^{-1/2}$ , где  $Re_m = 4\pi\sigma_0 A/Lc^2 \gg 1$  — магн. Рейнольдса число,  $L$  — характерный размер слоя. Для солнечной плазмы магн. число Рейнольдса очень велико, и поэтому скорость сближения магн. силовых линий составляет малую часть альевновской скорости. В модели Петчека кроме диффузионной области имеется ещё и волновая: четыре стоячие ударные волны (медленно движущиеся относительно плазмы), в к-рых осуществляется осн. перестройка магн. поля. Пересекая ударные волны, плазма отворачивает вырво или влево от области П., и магн. силовые линии перематываются в новые конфигурации. Это позволяет повысить темп П. до величины  $M \sim 1/\ln Re_m$ . Подобные модели [4] могут использоваться и в беспотенциальн. плазме, если толщина слоя настолько мала, что возможны развитие токовых неустойчивостей и возникновение аномального сопротивления.

Вынужденное П. рассматривалось также Х. Альвеном в модели движения отд. частиц. Пренебрегая тепловыми скоростями электронов и ионов, в этой модели можно найти самосогласов. связь электрич. и магн. полей и получить для темпа П. величину  $M \sim c/\omega_{pi}d$ , где  $d$  — поперечный размер системы,  $\omega_{pi}$  — ионная плазменная частота.

В модели разрыва нейтрального слоя, предложенной С. И. Сыроваткиным [2], процесс П. рассматривается как динамический и существенно нестационарный. Исходная конфигурация магн. полей имеет прибл. такой же

вид, как на рис. 1, но величина электрич. поля полагается настолько большой, что вместо квазистационарного течения плазмы в системе реализуется течение кумулятивного типа. Поток замороженного в плазму магн. поля, поступающий к нейтральной линии, не успевает пересоединиться и «расплюсчивается» её в широкий токовый слой, вблизи к-рого плотность частиц прогрессирующе убывает, что приводит к разрыву слоя. При быстрых перестройках (разрывах) магн. поля возникают сильные импульсные индукц. электрич. поля, к-рые могут ускорять заряд. частицы до больших скоростей (см. Разрыв магнитосферодинамические). Динамич. модели вынужденного П. используются при исследовании вспышек на Солнце. Подобные явления наблюдались и при лаб. моделировании процесса П.

При рассмотрении П. как спонтанного (самопроизвольно возникающего) процесса простейшая модель нейтрального слоя (рис. 2а) представляет собой плазменную конфигурацию с антипараллельными магн. полями, в центре к-рой существует плоскость, где магн. поле обращается в нуль. В более общем случае в систе-

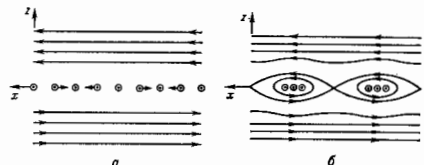


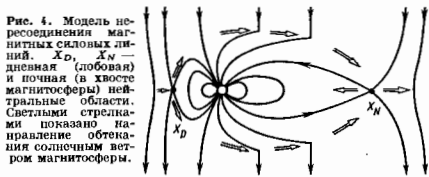
Рис. 2. Нейтральный слой в плазме: а — конфигурация неустойчива из-за прилегания друг к другу параллельных токов, текущих поперёк магнитного поля (кружки); б — спонтанное пересоединение магнитных полей (образование магнитных островов).

ме возможно и магн. поле, перпендикулярное плоскости рисунка. Важно, чтобы имела компонента магн. поля, меняющая свой знак (на рис. 2 по оси  $z$ ). Неоднородное магн. поле, показанное на рис. 2, создаётся поперечными токами, локализованными в окрестности нейтрального слоя. Как всякие параллельные токи, эти токи притягиваются друг к другу и стремятся «слипнуться» в токовые волокна (пичивание тока). Для того чтобы тенденция токов к пичиванию реализовалась, необходимо, чтобы в рассматриваемой системе имелся хотя бы один из тех механизмов нарушения замкнутости, о к-рых говорилось выше. Пичивание ведёт к перестройке магн. поля — перезамыканию магн. силовых линий и образованию магн. островков (рис. 2б). Спонтанный процесс П. (т. е. разрыва силовых линий существующего магн. поля) обычно наз. разрывной (или тиринг-) неустойчивостью (РН). В зависимости от того, какой физ. механизм ответствен за разрыв магн. поля, рассматривают резистивные, инерционные и резонансные моды РН. Для процессов в высокотемпературной космич. плазме характерна резонансная мода РН, связанная с бесстолкновит. передачей энергии резонансным частицам (Ландау затухание). В термодерных установках проявляются т. и. полустолкновит. кинетич. режимы РН, для к-рых уже неприменимо простое МГД-описание. Конкретным механизмом П. определяется характерное время процесса, но качество во всех случаях эволюция системы осуществляется аналогичным образом, показанным на рис. 2. Спонтанное П. также удаётся наблюдать в лаб. экспериментах. Для анализа устойчивости реальных плазменных конфигураций необходимо учесть влияние всегда имеющейся нормальной компоненты магн. поля. Даже очень малая величина этой компоненты меняет свойства системы (особенно в бесстолкновит. случае) кардинальным образом [3]: РН стабилизируется, и конфигурация приобретает метастабильные свойства.

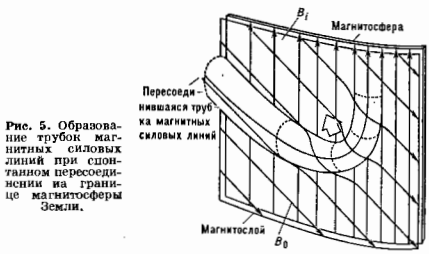
Магн. конфигурация с обращённым полем при наличии нормальной компоненты (рис. 3) способна накопить значит. кол-во магн. энергии без её немедленного высвобождения. Срыв процесса накопления при достижении системой порогового значения ведёт к бурному взрывному выделению запасённой энергии. Эта



способность процессов П., по-видимому, проявляется в солнечных вспышках [4] и магнитосферных суббурях. П. является одним из осн. физ. процессов, контролирующих структуру и динамику магнитосферы. Согласно модели Давжи [5], межпланетное и геомагн. поля впервые пересоединяются в лобовой области на границе магнитосферы (рис. 4), где П. носит импульсивный



всплеск. Пересоединившиеся магн. волокна diam.  $\sim 1-2$  радиуса Земли (рис. 5) вместе с потоком обтекающей магнитосферу солнечной плазмы уносятся на ночную сторону в магнитосферный хвост, где и пересоединяются в обратной последовательности



[6]. Топологич. связь межпланетного поля с магн. полем Земли и наличие коопетивных движений плазмы в магнитосфере, связанных с П., доказаны многолетними наземными и спутниковыми наблюдениями.

Процесс П. важен и в физике Солнца. Нагрев верх.



Рис. 6. Модель пересоединения межпланетного магнитного потока с лежащим выше полем для небольшой солнечной вспышки.  $q$  — потоки тепла. Тёмные стрелки — потоки плазмы. Запнтрихована зона аннигиляции магнитных полей.

хромосферы и короны Солнца всё чаще связывают с диссипацией магн. полей (т. е. с одной из форм П.). П. магн. силовых линий используются в самых разнообразных моделях солнечных вспышек. По одной из таких моделей небольшой петлевой вспышки всплывающий поток (рис. 6) пересоединяется с лежащим выше полем. Выделяющееся тепло и ускоренные частицы направляются вниз в ниж. часть хромосферы, где вызывают  $H_{\alpha}$ -вспышку [7] (см. *Вспышка на Солнце*).

Лит.: 1) Vasiliadis V. M., Theoretical models of magnetic field line merging, *Rev. Geophys. and Space Phys.*, 1975, т. 13, № 4, р. 303; 2) Неустойчивые токовые слои в плазме, «Тр. ФИАН», 1974, т. 74; 3) Галес А. А., Зельдович Л. М., Метастабильные состояния диффузного нейтрального слоя в коронах газа субюри, «Известия в ЖЭТФ», 1975, т. 22, № 7, с. 360; 4) Сомов Б. В., Проблемы физики солнечных вспышек, М., 1982, с. 5—52; 5) Акасофу С. И., Ченмеи С., Солнечно-земная физика, пер. с англ., ч. 2, М., 1975, с. 50; 6) Зельдович Л. М., Динамика плазмы и магнитных полей в хромосфере Солнца, в кн.: Итоги науки и техники, Сер. Исследования космического пространства, т. 21, М., 1986; 7) Прист Э. Р., Солнечная магнитогазодинамика, пер. с англ., М., 1985.

**ПЕРЕСТАНОВОК ГРУППА** степени  $n$  — множество  $S(n)$  перестановок  $n$  «предметов». П. г. также наз. с и м е т р и ч е с к о й г р у п п о й. Условно считать, что данные предметы размещены на  $n$  заименованных местах и символ

$$S = \left\langle \left( \begin{matrix} i_1 i_2 \dots i_n \\ j_1 j_2 \dots j_n \end{matrix} \right) \mid (k, j, k = 1, 2, \dots, n) \right\rangle$$

обозначает перестановку,  $k$ -рая состоит в перемещении предмета с места  $ik$  на место  $jk$  (движение вниз). Из этого представления видно, что порядок расположения пар  $(ik, jk)$  в символе  $S$  не имеет значения, а умножение в группе  $S(n)$

$$\left\langle \left( \begin{matrix} i_1 i_2 \dots i_n \\ k_1 k_2 \dots k_n \end{matrix} \right) \left( \begin{matrix} i_1 i_2 \dots i_n \\ j_1 j_2 \dots j_n \end{matrix} \right) \right\rangle = \left\langle \left( \begin{matrix} i_1 i_2 \dots i_n \\ k_1 k_2 \dots k_n \end{matrix} \right) \right\rangle$$

напоминает закон умножения матриц. П. г. является конечной группой порядка  $n!$

Элементы на  $S(n)$  могут быть порождены более простыми элементами, наз. **циклами** или **транспозициями**, напр.

$$\left\langle \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 6 & 7 & 5 & 8 & 9 \end{matrix} \right\rangle = (1234)(567)(8)(9),$$

где каждый цикл  $(i_1 i_2 \dots i_m)$  определяется как частичная перестановка

$$\left\langle \left( \begin{matrix} i_1 i_2 \dots i_{m-1} i_m \\ i_2 i_3 \dots i_m i_1 \end{matrix} \right) \right\rangle.$$

Цикл из двух символов наз. **транспозицией**. Цикл можно записать иначе:  $(1234) = (2341) = (3412) = (4123)$ ; произведение непересекающихся циклов коммутативно:  $(1234)(567) = (567)(1234)$ ; цикл с одним символом обычно опускают. Любой цикл можно представить как произведение транспозиций:  $(1234) = (12)(13)(14)$  (действие слева направо). Каждая перестановка представляется в виде произведения непересекающихся циклов (однозначно, с точностью до порядка множителей). Каждая конечная группа порядка  $n$  изоморфна подгруппе группы  $S(n)$  (теорема Кэли).

Группа  $S(n)$  допускает точное линейное представление (см. *Представление группы*) в векторном пространстве  $V_n$  размерности  $n$ . Оператор представления  $T_x$  переводит  $x \in V_n$  в  $x' = T_x x \in V_n$ , так что в произвольном фиксиров. базисе  $e_1, e_2, \dots, e_n$  представление  $T_x$  элемента  $S$  действует след. образом:

$$T_x e_{ik} = e_{jk} \quad (ik, jk = 1, 2, \dots, n).$$

В каждом столбце и в каждой строке матрицы  $T_x$  содержится по единств. элементу, равному единице, все остальные элементы равны нулю. Все неприводимые представления П. г. можно описать при помощи Юнга схем.

Если физ. система состоит из  $n$  тождественных частиц, то группа симметрии её гамальтонова будет содержать группу  $S(n)$ .

Лит.: Любарский Г. Я., Теория групп и ее применение в физике, М., 1958; Хамерш М., Теория групп и ее применение в физических проблемах, пер. с англ., М., 1966; Варту А., Соичи Р., Теория представлений групп и ее приложения, пер. с англ., ч. 1—2, М., 1980.

**ПЕРЕСТАНОВОЧНЫЕ СООТНОШЕНИЯ** — алгебраич. равенства,  $k$ -рым подчинены коммутаторы или антикоммутаторы нек-рых мате. величин, в частности величин, встречающихся при формулировке квантовой теории, напр. операторов квантовой механики. Если  $A_1$  и  $A_2$  — две такие величины, то коммутатором  $[A_1, A_2]$  наз. разность между произведениями  $A_1 A_2$  и  $A_2 A_1$ , т. е.  $[A_1, A_2] = A_1 A_2 - A_2 A_1$ . Антикоммутатором  $\{A_1, A_2\}$  наз. сумма этих произведений, т. е.  $\{A_1, A_2\} = A_1 A_2 + A_2 A_1$ . Обычно коммутаторы или антикоммутаторы нек-рой совокупности величин  $A_1, A_2, \dots, A_n$  выражаются посредством П. с. через линейные комбинации тех же величин. Важнейшие свойства (напр., допустимые значения) физ. величин  $A_1, \dots, A_n$  определяются именно П. с. и не зависят от представления последних, т. е. от того, каким конкретным способом реализованы величины  $A_1, \dots, A_n$ . Это объясняется фундам. роль П. с. в квантовой физике.

Если П. с. не включают антикоммутаторов, т. е. имеют вид  $[A_j, A_k] = \sum_{i,j,k} c_{ijk} A_i$ , то П. с. задают век-ную

Ли алгебру, причём числа  $c_{ijk}$  наз. структурными константами соответствующей Ли группы, а величины  $A_1, \dots, A_n$  — генераторами этой группы. Реализация генераторов  $A_1, \dots, A_n$  самосопряжёнными операторами в гильбертовом пространстве или конечномерном евклидовом пространстве наз. представлением алгебры Ли. Приведём нек-рые примеры.

Если все  $c_{ijk} = 0$ , т. е. если все попарные коммутаторы равны нулю, то соответствующая группа наз. абелевой или коммутативной. Тогда в каждом представлении можно одновременно привести генераторы  $A_1, \dots, A_n$  к диагональному виду. Физически это означает, что величины  $A_1, \dots, A_n$  могут иметь одновременно точные значения. Если в числе генераторов есть гамальтонов  $\hat{H}$  квантовой системы, то в состояниях с фиксиров. энергией  $\mathcal{E}$  все др. физ. величины из числа генераторов  $A_1, \dots, A_n$  также могут принимать вполне определ. значения. Поскольку гамальтонов управляет временной эволюцией системы, все величины  $A_1, \dots, A_n$  оказываются интегралами движения, т. е. сохраняются с течением времени. Так, в задаче о движении частицы в центр. поле попарно перестановочными являются гамальтонов  $\hat{H}$ , оператор квадрата момента импульса  $\hat{L}^2$  и оператор  $\hat{L}_z$  проекции момента импульса на  $k$ -л. ось. Поэтому в пространстве состояний существует базис, составленный из собств. векторов сразу трёх операторов:  $\hat{H}$ ,  $\hat{L}^2$  и  $\hat{L}_z$ . Это позволяет использовать стандартную классификацию состояний частицы с помощью трёх квантовых чисел — главного  $n$ , орбитального (акумального)  $l$  и магнитного  $m$ .

Если  $n = 3$ , а  $A_1 = \hat{L}_x, A_2 = \hat{L}_y, A_3 = \hat{L}_z$  — проекции операторов момента импульса на оси  $x, y, z$ , то П. с. приобретают форму  $[\hat{L}_j, \hat{L}_k] = i \sum_{j,k,l} \epsilon_{jkl} \hat{L}_l$ , где  $\epsilon_{jkl}$  — полностью антисимметричный тензор. В этом случае П. с. задают простейшую небелевую алгебру — алгебру Ли группы  $SU_2$ . Группа  $SU_2$  возникает в физике всегда, когда физ. система обладает симметрией по отношению к вращениям трёхмерного пространства. Из П. с. видно, что разл. проекции момента не перестановочны друг с другом, так что они не имеют одновременно точных значений. К диагональному виду можно привести любой, но только один из трёх операторов, напр.  $\hat{L}_z$ . Его собств. значения дискретны и равны  $\hbar m$ , где  $m$  — целое или полуцелое число. Квадрат оператора

момента  $\hat{L}^2 = \hat{L}_1^2 + \hat{L}_2^2 + \hat{L}_3^2$  также имеет лишь дискретные состояния. значения  $\hbar^2 l(l+1)$ , где  $l$  — целое или полуцелое неотрицат. число. При заданном  $l$  имеем  $m = -l, l-1, \dots, -l$ . Если  $l$  целое, то  $l$  и  $m$  являются унитарными орбитальным и магнитным квантовыми числами.

Если  $l = 8$ , а П. с. имеют ту же форму  $[A_j, A_k] = -i \sum_{j,k} \epsilon_{jkl} A_l$ , но  $j, k, l = 1, 2, \dots, 8$ , то П. с. определяют алгебру Ли группы  $SU_8$ . Её генераторы порождают, напр., «вращения» в пространстве цветов кварка. По отношению к таким вращениям симметричен гамма-теория кантовой хромодинамики — теория, описывающая сильное взаимодействие элементарных частиц. Физ. состояния кантовой хромодинамики должны быть «бесцветными», т. е. принадлежать одномерным (синглетным) представлениям группы  $SU_3$ .

Пусть  $l = 3$ , а  $A_1 = \hat{q}$ ,  $A_2 = \hat{p}$ ,  $A_3 = \hat{I}$ , где  $\hat{I}$  — единичный оператор, а  $\hat{q}$  и  $\hat{p}$  — операторы координаты и импульса частицы. Равенство  $[\hat{q}\hat{p}] = i\hbar \hat{I}$  задаёт т. н. квантовый П. с. для системы с одной степенью свободы. Они определяют алгебру Ли группы Гейзенберга. Из них видно, что координата и импульс не могут принимать одновременно определ. значения. Если  $\Delta q$  и  $\Delta p$  — неопределённости в значениях координаты и импульса, то  $\Delta q \Delta p \geq \hbar$ . Это — частный случай неопределённости соотношения. Для системы с  $m$  степенями свободы, т. е. для системы, гамма-теория к-рой зависит от  $m$  операторов обобщённых координат  $\hat{q}_1, \dots, \hat{q}_m$  и от  $m$  сопряжённых этим координатам импульсов  $\hat{p}_1, \dots, \hat{p}_m$ , канонич. П. с. имеют вид  $[\hat{q}_i, \hat{p}_j] = i\hbar \delta_{ij}$  (здесь выписаны только ненулевые коммутаторы). Вообще, переход от классического к квантовому описанию физ. системы можно трактовать как замену классических Пуассона сбок коммутаторами операторов соответствующих величин. Из канонич. П. с. следует, что каждая пара канонич. переменных  $q_i, p_i$  удовлетворяет соотношению неопределённости. В представлении, в к-ром все операторы координат диагональны [т. е. в представлении, где состояние задаётся волновой ф-цией  $\Psi(q_1, \dots, q_m)$ , причём  $\hat{q}_i \Psi = q_i \Psi$ ], операторы импульсов действуют по правилу  $\hat{p}_j \Psi = (\hbar/i) \partial \Psi / \partial q_j$ . В случае конечного числа степеней свободы все др. корректные представления канонич. П. с. связаны с описанным посредством не-кого унитарного преобразования, т. е. эквивалентны ему. Часто вместо координат и импульсов используют операторы рождения  $a_j^+ = (\hat{q}_j - i\hat{p}_j) / \sqrt{2}$  и уничтожения  $a_j = (\hat{q}_j + i\hat{p}_j) / \sqrt{2}$ .

П. с. для них принимают форму  $[a_j, a_k^+] = \hbar f$  (выписаны только ненулевые коммутаторы). В случае бесконечного числа степеней свободы (когда  $m = \infty$ ) разл. представления канонич. П. с. уже не обязательно эквивалентны друг другу. Обычно используют Фока представления или представление с вакуумом.

Важнейшие системы с бесконечным числом степеней свободы — релятивистские кантовые поля. Так, свободное скалярное безмассовое вещество. поле  $\phi(x) = \phi(x_0, x)$ , зависящее от времени  $x_0$  и координат  $x$  пространств. точки, задано равенством

$$\square \phi(x_0, x) = \frac{1}{\sqrt{2(2\pi)^3}} \int \frac{d^3k}{ik} [\exp(i|k|x_0 - ikx) a^+(k) + \exp(-i|k|x_0 + ikx) a(k)]$$

(в системе единиц, в к-рой  $\hbar = c = 1$ ). Операторные ф-ции  $a^+(k)$  и  $a(k)$  удовлетворяют П. с.  $[a(k), a^+(k')] = \delta(k - k')$ , где  $\delta(k)$  — дельта-функция Дирака. С дискретными операторами рождения и уничтожения  $a_j^+$  и  $a_j$  функция  $a^+(k)$  и  $a(k)$  связаны равенствами

$$a_j^+ = \int dk v_j(k) a^+(k) \text{ и } a_j = \int dk v_j(k) a(k),$$

причём  $v_j(k)$  — нек-рая ортонормирован. система ф-ций. Свободное поле  $\phi(x)$  подчинено след. двумерным П. с.:

$$[\phi(x_0, x), \phi(x'_0, x')] = i\delta(x - x'),$$

$$x_0 = x'_0$$

где точка означает производную по времени. Если времена  $x_0$  и  $x'_0$  различны, то  $[\phi(x), \phi(x')] = D(x - x')$ , где  $D(x)$  — перестановочная функция Паули — Йордана. Взаимодействующие поля обладают только частью свойств свободных полей, выраженных П. с., они должны быть локально коммутативны, т. е. их коммутаторы должны обращаться в нуль в точках, разделённых пространственноподобным интервалом (см. Локальная коммутативность). Одновременные П. с. для взаимодействующих полей теряют смысл в силу Хага теоремы.

Классич. пример П. с. с участием антикоммутаторов или, как говорят, антиперестановочных соотношений — алгебра Дирака матриц  $\gamma$ :  $\{\gamma_\mu \gamma_\nu\} = 2\delta_{\mu\nu}$  ( $\delta_{\mu\nu}$  — метрич. тензор,  $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ ;  $-\delta_{00} = \delta_{11} = \delta_{22} = \delta_{33} = -1$ ). Физически существующие только эти алгебраич. равенства, конкретный выбор  $\gamma$ -матриц не играет роли. Антиперестановочным соотношениям удовлетворяет фермионное спинорное поле  $\psi_0(x)$ . Ненулевые антикоммутаторы для поля  $\psi$  имеют вид

$$\{\psi_\alpha(x'), \bar{\psi}_\beta(x'')\} = i \sum_{\mu} \gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial}{\partial x''_{\mu}} D(x - x'')$$

где  $\bar{\psi}$  — дираковский сопряжённый к  $\psi$  спинор:  $\bar{\psi} = \psi^* \gamma_0$  ( $\psi^*$  — эрмитово сопряжённый спинор). В релятивистской кантовой теории используются также П. с., в к-рые входят сразу и антикоммутаторы и коммутаторы физ. величин. Также П. с. наз. супералгебрами. Если теория инвариантна относительно преобразований, образующих нек-рую супералгебру, она наз. суперсимметричной кантовой теорией поля (см. Суперсимметрия).

Лит.: Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Введение в теорию кантовых полей, 4 изд., М., 1984; Дирак П. А. М., Принципы кантовой механики, пер. с англ., 2 изд., М., 1979. О. И. Звольнов.

**ПЕРЕСТАНОВОЧНЫЕ ФУНКЦИИ** — коммутаторы (или антикоммутаторы) операторов свободных бозонных (фермионных) полей, взятых в разных пространственно-временных точках  $x = (x_0, x)$  и  $y = (y_0, y)$ . Так, в теории вещественного скалярного поля  $\phi(x)$  П. ф. есть

$$D(x - y) = i[\phi(x), \phi(y)]. \quad (1)$$

[В. Паули (W. Pauli), П. Йордан (P. Jordan), 1922]. Важнейшее свойство П. ф. — обращение их в нуль вне светового конуса, т. е. при  $(x - y)^2 = (x_0 - y_0)^2 - (x - y)^2 < 0$ . Это свойство отражает микропричинность локальных кантовых теорий поля: любые операторы, определённые в точках, разделённых пространственноподобным интервалом, всегда коммутируют (даже при учёте взаимодействия), и соответствующие динамич. величины допускают независимое измерение. Явное выражение для  $D(x)$  (в системе единиц  $\hbar = c = 1$ ) имеет вид

$$D(x) = \frac{i}{(2\pi)^4} \int e^{-ikx} \epsilon(k_0) \delta(k^2 - m^2) d^4k = \frac{1}{2\pi} \epsilon(x_0) \delta(x^2) - \frac{m}{4\pi \sqrt{x^2}} \epsilon(x_0) \theta(x^2) J_1(m\sqrt{x^2}), \quad (2)$$

где  $m$  — масса скалярной частицы,  $k = (k_0, k)$  — 4-импульс,  $\delta(x)$  — дельта-функция Дирака,  $\epsilon(x) = x/|x|$ ,  $\theta(x) = 1/2[1 + \text{erf}(x)]$  и  $J_1(x)$  — ф-ция Бесселя (см. Цилиндрические функции). Т. о.,  $D(x)$  является общепринятой ф-цией с сингулярностью на световом конусе  $x^2 = 0$ .

$D(x)$  удовлетворяет одностороннему *Клейна—Гордона* уравнению

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + m^2\right)D(x) = 0 \quad (3)$$

и представляя в виде суммы линейно независимых решений этого уравнения  $D_+(x)$  и  $D_-(x)$ :

$$D_{\pm}(x) = \mp \frac{i}{(2\pi)^{3/2}} \int e^{ikx} \delta(\pm k^2 - m^2) d^4k, \quad (4)$$

которые часто используются в приложениях. Имеет место равенство

$$\frac{\partial D(x-y)}{\partial x_\alpha} \Big|_{x_0=y_0} = \delta(x-y), \quad (5)$$

являющиеся следствием перестановочных соотношений для канонически сопряженных величин  $\psi(x_0, \mathbf{x})$  и  $\pi(x_0, \mathbf{x}) = \partial\psi(x_0, \mathbf{x})/\partial x_0$ .

П. ф. массивного *Дирака* поля  $\Psi(x)$  имеет вид

$$S_{\alpha\beta}(x) = i(\Psi_\alpha(x), \bar{\Psi}_\beta(y)) = (iy_\alpha \partial/\partial x_\alpha + m)_{\alpha\beta} D(x), \quad (6)$$

где  $\Psi(x) = \Psi^*(x) \gamma_0$ ,  $\gamma_\mu$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ ) — *Дирака матрицы*,  $\Psi^*$  — армитово сопряжённое поле.

Лит.: А. Исаев А. И., Верестецкий В. В., Квантовая электродинамика, 4 изд., М., 1981; Боголюбов Н. Н., Широкое Д. В., Введение в теорию квантовых полей, 4 изд., М., 1984. А. В. Смелга.

**ПЕРЕХОД КВАНТОВЫЙ** — см. *Квантовый переход*.

**ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ — ДИЭЛЕКТРИК** — фазовый переход, сопровождающийся изменением величины и характера электропроводности при изменении температуры  $T$ , давления  $p$ , магн. поля  $H$  или состава вещества. П. м. — д. наблюдаются в ряде твёрдых тел, иногда в жидкостях и газах (плотных парах металлов). Проводимость  $\sigma$  при П. м. — д. может меняться сильно (в  $10^7$  раз в  $V_2O_5$ , в  $10^{10}$  раз в шестехексаметричном  $EuO$ ). П. м. — д. легко идентифицируются, если он является *фазовым переходом* первого рода. В случае перехода 2-го рода классификация его как П. м. — д. часто затруднительна и условна, т. к. при  $T \neq 0K$  проводимость  $\sigma \neq 0$  по обе стороны перехода и в самой точке перехода непрерывна. Строгое же разделение веществ на *металлы и диэлектрики (полупроводники)* можно дать только при  $T = 0K$ : у металлов при  $T = 0K$   $\sigma(\omega) \neq 0$ , у диэлектриков  $\sigma(\omega)_{\omega \rightarrow 0} = 0$ . С ростом  $T$  в металлах обычно сопротивление растёт, а в диэлектриках и полупроводниках падает.

В стандартной зонной схеме твёрдых тел в диэлектриках и полупроводниках заполненные зоны отделены от пустых запрещённой зоной (энергетич. щель)  $\mathcal{E}_g$ , а в металлах есть зоны, заполненные частично, и электроны могут двигаться по этим зонам в слабом электрич. поле (см. *Зонная теория*). Структура зон в одноэлектронном приближении связана с симметрией кристаллич. решётки. П. м. — д. может быть связан с изменением решётки, т. е. со структурным фазовым переходом. Такова природа П. м. — д. во мн. *квазиодномерных соединений* и *квазидвумерных соединений* (слоистых). В этом случае переход наз. *Пайерлса переходом* или переходом с образованием *ваоны зарядовой плотности*. С изменением симметрии решётки связаны П. м. — д. и в др. веществах, напр. переход белого олова в серое («оловянная чума»). С изменением ближнего порядка связаны П. м. — д., происходящие при плавлении мв. полупроводников (см. *Дальний и ближний порядок*). Так, в Ge и Si, имеющих в твёрдой фазе решётку типа алмаза, при плавлении меняется ближний порядок и они становятся *жидкими металлами*.

Упирением разрешённых зон и исчезновением энергетич. щели, обусловленными изменением симметрии решётки, обычно объясняют и металлизацию мв. диэлектриков и полупроводников при высоких давлениях. Возможно, этим определяются наличие металлич. ядра в недрах Земли.

Во мн. веществах наличие диэлектрич. осн. состояния (при  $T = 0K$ ) и П. м. — д. не объясняются одноэлектронной зонной схемой и связаны с межэлектронным взаимодействием. Напр., во мн. соединениях переходных и редкоземельных металлов (*лантаноидов*) электроны внутренних, частично заполненных  $d$ - или  $f$ -оболочек оказываются локализованными в ионном остове, и переход их на соседние зоны, требующийся для появления металлич. проводимости, невозможен вследствие большого проигрыша в энергии межэлектронного взаимодействия (пересекающийся электрон сильно отталкивается от уже имеющегося на ионе «своего» локализов. электрона). Вещества, являющиеся диэлектриками по этой причине, наз. *моттовскими диэлектриками* (или диэлектриками Мотта — Хаббарда). К ним относятся, напр., оксиды переходных металлов типа  $NiO$ ,  $CoO$  и т. д. П. м. — д. в подобных системах может быть связан с исчезновением мотт — хаббардовской щели, напр. при изменении давления или темп-ры. Видимо, такова в осн. природа П. м. — д. в  $V_2O_5$  и в сходных соединениях, хотя определ. вклад в переход здесь может давать и взаимодействие электронов с решёткой. В общем случае выделение осн. причины П. м. — д. часто затруднительно, т. к., по-видимому, в переход дают вклад разные механизмы. Если П. м. — д. имеет характер моттовского, то он обычно тесно связан с изменением магн. свойств вещества, т. к. локализов. электроны обладают локализов. магн. моментом. Поэтому вещества в фазе моттовского диэлектрика обычно имеют магн. упорядочение (как правило, антиферромагнитное).

В *неупорядоченных системах* (неупорядоченные сплавы, сильнодеформир. полупроводники, аморфные вещества) состояние электрона, движущегося в случайном (хаотич.) потенциале, может оказаться локализованным в пространстве, несмотря на то, что его энергетич. спектр непрерывен (*андерсоновская локализация*). Соответственно подвижность электрона обращается в нуль, и вещество может оказаться диэлектриком. В этих случаях П. м. — д. (или обратный переход) может быть вызван изменением степени неупорядоченности системы или изменением концентрации электронов (*химического потенциала*), если уровень Ферми пересечёт в и. пороге подвижности и выйдет в область делокализ. состояний.

Явление П. м. — д. используется на практике (термисторы и резисторы, устройства для записи и хранения информации и т. д.).

Лит.: Мотт Н. Ф., *Переходы металл — изолятор*, пер. с англ., М., 1978; Бугаев А. А., Захарченко Б. П., Чудновский Ф. А., *Фазовый переход металл — полупроводник и его применение*, Л., 1979. Д. И. Хомский.

**ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЕТЕКТОР** — детектор быстрых заряд. частиц, регистрирующий *переходное излучение*, испускаемое при пересечении частицей границы раздела сред с разл. диэлектрич. проницаемостью. Интенсивность переходного излучения в широкой области энергий пропорц. квадрату заряда частицы ( $Ze^2$ ) и лоренц-фактору частицы  $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$ , где  $v$  — скорость частицы. Осн. часть излучения ле-

Рентгеновское переходное излучение

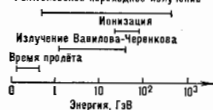


Рис. 1. Области энергии, где возможно разделение электронов и пионов при различных методах регистрации (длина детектора  $L \leq 2$  м).

жит в рентг. диапазоне частот и направлена вперед в угле  $\theta \approx 1/\gamma$ . Эти свойства рентг. переходного излучения (РПИ) используют для идентификации (определения массы или заряда) частиц высоких энергий ( $\gamma \geq 10^3$ ), когда применение др. методов невозможно или затруднено (рис. 1).

П. и. д. состоит из радиатора и собственно детектора (напр., дрейфовой камеры; рис. 2), регистрирующего рентг. фотоны, испускаемые частицей в радиаторе. Радиатор должен удовлетворять противоречивым требованиям: эффективно генерировать и слабо поглощать РПИ. Поскольку интенсивность РПИ мала (в ср. 1 квант на 137 границ раздела), то применяют слоистые или пористые радиаторы с большим числом границ раздела из материалов с низким ат. номером. Слоистый радиатор представляет собой регулярную стопку, содержащую неск. сотен тонких (5–100 мкм) фольг или пленок из легкого вещества (Li, Be, полипропилен, лавсан) с зазором 0,1–2 мм между ними. В качестве пористых радиаторов применяют гранулированный LiH, лёгкий пенопласт, полипропиленовое или углеродное волокно. Толщина фольги (волока) и ширина зазоров должны удовлетворять требованиям к длине формирования РПИ. Правильно подобранный нерегуляр-

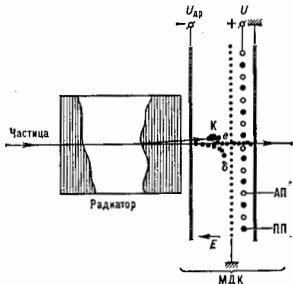


Рис. 2. Сечение детектора: МДК — многопробочная дрейфовая камера; AP — анодные проволоочки; ПП — проволочки, формирующие поле;  $U_{др}$  — дрейфовый потенциал;  $U_{анн}$  — анодное напряжение;  $e^-$  — электроны ионизации вдоль трека частицы;  $\delta$  — длина электронов; К — кластер, образованный в результате фотоионизации газа фотоном рентгеновского переходного излучения.

ный радиатор генерирует всего на 10–15% меньше фотонов РПИ, чем регулярный слоистый из того же материала.

Для уменьшения поглощения фотонов в радиаторе П. и. д. секционирован; каждая из секций содержит короткий радиатор вместе с устройством, регистрирующим рентг. фотоны. Материал радиатора, толщину фольги или волока, ширину зазоров, число слоев в стопке, состав и толщину вещества регистрирующего устройства, число секций детектора при заданной его длине  $L$  предварительно оптимизируют на ЭВМ с целью обеспечить макс. число фотонов в наиб. удобном для регистрации энергетич. диапазоне (3–20 кэВ). Толщина радиатора в каждой секции, как правило, составляет 0,1–0,2 г/см<sup>2</sup>, число регистрируемых фотонов 10–20 (т. е. ок. 0,1 на 1 см длины радиатора), число секций  $\sim 40$ ,  $L \sim 1-3$  м.

Для регистрации фотонов РПИ пригоден любой газоразрядный детектор частиц с тонким входным окном, содержащий тяжёлый инертный газ (Xe, Kr, Ar), или твердотельный детектор. Чаще всего применяют пропорциональную камеру или дрейфовую камеру (здесьна стрижмерную камеру), а также сцинтилляционные детекторы и полупроводниковые детекторы. При этом возникает необходимость выделять сигнал РПИ на фоне ионизации, производимой быстрой заряд. частицей в том же детекторе. Из-за больших флуктуаций, характерных для обоих процессов, прямое вычитание вклада ионизации из суммарного сигнала невозможно. Для решения этой задачи пользуются неск. методами.

1) Отклонение частицы в магн. поле позволяет прост-

равственно разделить её трек от фотонов РПИ. Применение метода ограничено необходимостью увеличения длины установки и снижением её светосилы. 2) Измерение энергоделеделения. Используя различие в амплитудном распределении сигналов от фотоэлектронов РПИ и сигналов, связанных с электронами ионизации, удаётся с большой достоверностью разделять частицы, т. е. более или менее точно оценивать их массу или заряд. 3) Счёт сгустков ионизации (кластеров) в больших энергоделеделениях (>3–5 кэВ). В П. и. д. такие кластеры, как правило, образуются фотонами РПИ, значительно реже — на треке ионизирующей частицы. Для их регистрации обычно используют проволочную дрейфовую камеру, подключённую к быстрому амплитудному дискриминатору с порогом в неск. кэВ. Фон создаётся  $\delta$ -электронами, к-рые благодаря большому пробегу часто удаётся отделить по сигналу на ближайших к треку проволочках. Метод счёта класте-

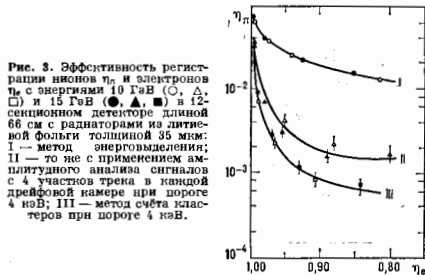


Рис. 3. Эффективность регистрации фотонов  $\eta_2$  и электронов  $\eta_1$  с энергиями 10 ГэВ (O,  $\Delta$ ,  $\square$ ) и 15 ГэВ ( $\bullet$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ) в 12-секционном детекторе длиной 66 см с радиаторами из литиевой фольги толщиной 35 мкм: I — метод энергоделеделения; II — то же с применением амплитудного анализа сигналов с 4 участками трека в канальной дрейфовой камере при пороге 4 кэВ; III — метод счёта кластеров при пороге 4 кэВ.

ров обладает наиб. достоверностью (рис. 3), и его легче использовать для идентификации частиц и создания быстрого триггера.

Осн. характеристика П. и. д. — зависимость между эффективностями регистрации частиц ( $\eta_1$  и  $\eta_2$ ) с разными лорентц-факторами ( $\gamma_1 < \gamma_2$ ), напр. фотонов и электронов одинаковой энергии (рис. 3). Эта зависимость определяется т. н. коэф. режекции и  $R = \eta_1/\eta_2 \leq 1$  (при  $\gamma_2 = 90\%$ ), к-рый характеризует относит. кол-во частиц с меньшим  $\gamma$  среди зарегистрированных. Значение  $R$  зависит от параметров П. и. д., методов измерения и обработки данных, а также от порога электронных устройств, с помощью к-рых измеряют энергоделеделение или число кластеров. В лучших комплектах ( $L \leq 1$  м) многосекционных П. и. д.  $R = 10^{-2} - 10^{-4}$  при  $\gamma = 10^3 - 10^5$ .

П. и. д. входят в состав ряда комбинированных систем детекторов, используемых в экспериментах на больших ускорителях. В частности, они позволяют выделять электроны на фоне большого числа адронов в многочастичных взаимодействиях или разделять адроны с разл. массой во внем. пучках ускорителей, а также при исследовании космич. лучей.

Даль. Отчеты: А. Г. Рентгеновское переходное излучение и его применение в эксперименте, «ФЭАН», 1985, т. 16, с. 137; D o l g o v a e i n V. B. Transition radiation detectors and particle identification, «Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research», 1987, ч. A253, п. 137. Г. И. Мерлин. ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ — излучение эл.-магн. волн равномерно и прямолинейно движущейся заряд. частицей при пересечении ею границы раздела двух сред с разными показателями преломления. Предсказан в 1945 В. Л. Гинзбургом и И. М. Франком, к-рые показали, что излучение должно возникать по обе стороны от границы раздела, и подсчитать энергию, излучаемую напад — в среду, из к-рой частица выходит. При движении заряд. частицы в односторонней среде её поле перемещается вместе с ней; характер поля определяется скоростью частицы и свойствами среды.

Когда частица переходит в др. среду, её поле меняется, что сопровождается излучением эл.-маг. волн. Расчёты показали, что назад излучаются эл.-маг. волны видимого диапазона независимо от скорости частицы, интенсивность этого излучения мала (примерно 1 фотон при пересечении границы раздела 100 частицами). При малых энергиях  $\epsilon$  частицы энергия, теряемая ею при П. и. назад, растёт пропорц.  $\epsilon^2$ , при высоких  $\epsilon$  этот рост замедляется.

Первое сообщение об эксперим. обнаружении П. п. назад появилось в 1958 г. И. от пучка частиц, падающего на металл. поверхность в вакууме, наблюдается визуально в виде яркого белого свечения; это пятно в том месте, куда падает пучок. Характеристики П. п., полученные экспериментально, оказались в хорошем согласии с теорией. С развитием эксперим. методов измерения определение П. п. в оптич. области стало настолько точным, что по его параметрам (спектру, поляризации, угл. распределению) можно судить об оптич. свойствах поверхностей.

Исследования П. п. вперёд показали, что при больших значениях  $\epsilon$  энергия этого излучения пропорц.  $\epsilon^2$ , а распространяется оно под очень малыми (обратно пропорц.  $\epsilon^2$ ) углами к направлению движения частицы. Частота П. п. вперёд (в отличие от П. п. назад) занимает очень широкую спектральную область, причём макс. частота  $\omega_{\text{макс}}$  пропорц.  $\epsilon^2$ :

$$\omega_{\text{макс}} = \omega_0 \frac{m_0}{m} c^2,$$

где  $\omega_0 = \frac{4\pi n e^2}{m}$ ,  $n$  — число электронов в единице объёма среды,  $m$  — масса электрона,  $m_0$  — масса излучающей частицы. Потери энергии на П. п. при высоких энергиях также пропорц. энергии:

$$W \approx \frac{e^4 \omega_0}{c^4} \left( \frac{\epsilon^2}{m_0 c^2} \right).$$

Напр., электрон с  $\epsilon = 10$  ГэВ, пересекающий границу раздела плотной среды и газа, излучает вперёд фотон с энергией 10 кэВ.

Линейный рост потерь на П. п. с увеличением  $\epsilon$  позволяет использовать его для определения энергии быстрых заряд. частиц (см. *Переходное излучение детекторы*).

П. п. на одной границе раздела представляет собой частный случай излучения, возникающего при движении заряд. частиц в неоднородной среде. Излучение, возникающее в сильно неоднородной среде, в принципе может быть использовано для детектирования заряд. частиц; П. п. может быть использовано также для определения свойств среды (плотности, периода кристаллич. решётки и т. д.). При движении быстрых заряд. частиц в определ. области углов имеет место интерференция между П. п. в Черенкова — Вагловского излучении.

Лит.: Гинзбург В. Л., Франк И. М., Излучение равномерно движущегося электрона, возникающее при его переходе из одной среды в другую, «ЖЭТФ», 1946, т. 16, с. 15; Га и р и б я н Г. М., К теории переходного излучения и мюонизационных потерь энергии частицы, там же, 1959, т. 37, в. 2, с. 527; Барсуков К. А., Переходное излучение в волноводе, там же, в. 4, с. 1106; Тер-Минасян М. Л., Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях, Ер., 1968; Га и р и б я н Г. М., Би и Ш., Рентгеновское переходное излучение, Ер., 1983; Гинзбург В. Л., Цытович В. Н., Переходное излучение и переходное рассеяние, М., 1984. Б. М. Болотниковский.

**ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** — хим. элементы побочных подгрупп (*b*-подгрупп) *периодической системы элементов*. К ним относятся *d*- и *f*-элементы, т. е. элементы, у к-рых происходит заполнение *3d*-, *4d*-, *5d*-оболочки (переходные металлы) или *4f*- и *5f*-оболочки (лантаноиды и актиноиды соответственно). Общее число П. э. 61. Все П. э. — металлы, особенности строения электронных оболочек П. э. определяют такие их свойства, как ферромагнетизм и антиферромагнетизм, аномалию изменения упругих констант, изменение теплот суб-

лимации и темп-р плавления при увеличении номера элемента. К П. э. обычно относят также Cu, Ag и Au, т. к. в соединениях, где их степень окисления больше 1 (напр., CuO), их *d*-оболочки заполнены не полностью и свойства соответствующих ионов (напр., Cu<sup>2+</sup>) аналогичны свойствам ионов П. э.

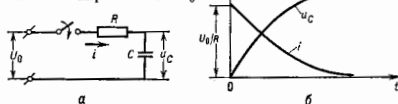
Лит.: В о с о в с к и й С. В., Изъямов Ю. А., Курмаев Э. Э., Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений, М., 1977; У м а н с к и й Я. С., С и а н о Ю. А., Физика металлов, М., 1978. С. С. Бердосов.

**ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС** в электрической цепи — процесс установления нового режима в электрич. цепи, возникающий в момент её коммутации. Коммутация наз. любое скачкообразное переключение пассивных элементов цепи, её ветвей или источников энергии. П. п. является промежуточным между прежним, установившимся процессом, существовавшим до коммутации, и новым, устанавливающимся в цепи теоретически через бесконечно большое время после коммутации. Практически значения токов и напряжений в П. п. становятся близкими к установившимся через конечные промежутки времени. Физ. причина П. п. — перераспределение энергии в реактивных элементах цепи (катушках индуктивности и конденсаторах), происходящее вследствие коммутации.

Обычно необходимо наименьшее время П. п. (импульсная техника, системы автоматич. регулирования и др.), однако имеются и исключения (напр., при ударном возбуждении колебат. контура для получения меток времени). При анализе линейных цепей применяют классический, операторный и суперпозиционный методы.

Классический метод анализа основан на решении системы интегро-дифференц. ур-ний для исследуемой цепи; полученную систему ур-ний сводят к линейной неоднородному ур-нию *n*-го порядка, где *n* определяет числом реактивных элементов в цепи. Решение этого ур-ния ищут в виде суммы двух *f*-ций — вынужденной и свободной составляющих. Далее находят нач. условия, используя непрерывность тока в катушках индуктивности и напряжения на конденсаторах (эти величины не могут меняться скачком при коммутации). По нач. условиям определяют амплитуды вынужденной и свободной составляющих, причём момент коммутации принимают обычно за начало отсчёта (*t* = 0).

Напр., для напряжения *u<sub>C</sub>* на конденсаторе *C* при подкючении *RC*-цепи к пост. напряжению *U<sub>0</sub>*



(рис. а) система интегро-дифференц. ур-ний такова:  $iR + C^{-1} \int i dt = U_0$ ,  $C^{-1} \int i dt = u_C$ , где *i* — ток через сопротивление *R*. Отсюда получаем ур-ние

$$RC du_C/dt + u_C = U_0,$$

решение к-рого, описывающее П. п., имеет вид

$$u_C(t) = U_0 + A \exp(-t/\tau),$$

где первое слагаемое соответствует вынужденной, а второе — свободной составляющим, *A* — постоянная интегрирования,  $\tau = RC$  — постоянная времени *RC*-цепи. Используя нач. условие  $u_C(0) = 0$ , получаем

$$u_C(t) = U_0 [1 - \exp(-t/\tau)],$$

$$i(t) = U_0 R^{-1} \exp(-t/\tau).$$

Графики зависимостей  $u_C(t)$  и  $i(t)$  приведены на рис. б. Для более сложных систем используют численные методы решения.



**Операторный метод анализа** основан на операторном способе решения дифференц. ур-ний, при к-ром каждой ф-ции шестец. переменной (оригиналу) с помощью *интегрального преобразования* ставится в соответствие изображение. Дифференц. ур-ние при этом заменяется алгебраическим, к решению к-рого применяют обратное интегр. преобразование. Обычно в теории цепей используют *Лапласа преобразование*

$$F(p) = \int_0^{\infty} dt f(t) \exp(-pt).$$

Анализ П. п. проводят в след. порядке: 1) составляют операторную схему исследуемой цепи, в к-рой резистивному элементу соответствует  $R$ , индуктивному —  $pL$ , ёмкостному —  $1/pC$ ; нач. условия учитывают с помощью эквивалентных источников энергии; источники эдс  $u_C(0)$  учитывают нач. напряжения на ёмкостях, а источники тока  $i_L(0)$  — нач. токи в индуктивностях; напряжения и токи, создаваемые реальными источниками, заменяют их изображениями; 2) по операторной схеме находят изображение искомого тока или напряжения; 3) с помощью обратного интегр. преобразования находят оригинал тока (напряжения). При выполнении преобразований пользуются справочными таблицами.

**Суперпозиционный метод анализа** в линейных цепях основан на принципе суперпозиции, при этом сложное воздействие разбивается на ряд более простых. Затем рассчитывают реакцию цепи на каждое из простых (стандартных) воздействий. Реакцию на сложное воздействие определяют как сумму реакций на стандартные воздействия.

Используют три вида стандартных сигнала: единичный сигнал — скачок напряжения (тока)  $1(t)$ ; единичный импульс  $\delta(t)$ ; единичный гармонический сигнал  $\exp(i\omega t)$ . Реакция цепи на единичный сигнал наз. *переходной характеристикой*  $h(t)$ . Реакция свободной от нач. запасов энергии цепи на единичный импульс наз. *импульсной характеристикой*  $h_s(t)$ . Реакция цепи на единичный гармонич. сигнал наз. *передаточной характеристикой*  $K(i\omega)$ . Стандартные сигналы  $1(t)$ ,  $\delta(t)$  и  $\exp(i\omega t)$  связаны между собой зависимостями

$$\delta(t) = d1(t)/dt = (2\pi i)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} dt \exp(i\omega t),$$

откуда следует однозначная связь между соответствующими характеристиками, напр.

$$K(i\omega) = i\omega \int_0^{\infty} h(t) \exp(-i\omega t) dt = \int_0^{\infty} h_s(t) \exp(-i\omega t) dt.$$

Знание характеристик  $K(i\omega)$ ,  $h(t)$  и  $h_s(t)$  и связей между ними позволяет судить в нек-рых случаях о характере П. п. в цепи. Так, предельные соотношения  $h(\infty) = K(0)$  и  $h(0) = K(\infty)$  показывают, что П. п. при воздействии единичного сигнала в первый момент определяется видом  $K(i\omega)$  в области ВЧ, а по мере его приближения к установившемуся режиму — видом  $K(i\omega)$  в области НЧ.

Переходная характеристика  $h(t)$  описывает П. п. при подключении свободной цепи к пост. напряжению. Импульсная характеристика описывает П. п. при воздействии на свободную цепь короткого (по сравнению с постоянной времени цепи) импульса. Реакцию  $b(t)$  свободной цепи на воздействие сигнала произвольной формы  $a(t)$  можно вычислить при помощи интеграла Дюамеля

$$b(t) = a(0)h(t) + \int_0^t (da/d\tau)h(t - \tau) d\tau,$$

$$b(t) = a(t)h(0) + \int_0^t a(\tau)h_s(t - \tau) d\tau.$$

Описанные методы применяются также и при анализе П. п. в др. физ. системах.

Лит.: Дяткин В. А., Прудников А. П., Интегральные преобразования и операционное исчисление. 2 изд., М., 1974; Илдохки И. С., Овчинников Н. И., Импульсные и цифровые устройства, М., 1973; Попов В. П., Основы теории цепей, М., 1985. В. В. Васин.

**ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ** — наименьший промежуток времени, через к-рый система, совершающая колебания, снова возвращается в то же состояние, в к-ром она находилась в нач. момент, выбранный произвольно. Строго говоря, понятие «П. к.» применимо лишь, когда значения к.-л. величин точно повторяются через одинаковые промежутки времени, например в случае гармонических колебаний. Однако понятие «П. к.» часто применяется и для приблизительно повторяющихся процессов.

**ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА** — промежуток времени, в течение к-рого исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается в 2 раза. Если при  $t = 0$  имелось  $N_0$  радиоактивных ядер, то во времени их число убывает по закону:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t),$$

где  $\lambda$  наз. *постоянной распада*. Величина  $\tau = 1/\lambda$  наз. ср. временем жизни радиоактивного ядра. П. п.  $T_{1/2}$  связан с  $\tau$  и  $\lambda$  соотношениями:

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 = 0,693/\lambda.$$

Лит. см. при ст. Радиоактивность.

**ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ**

Д. И. Менделеев а — система хим. элементов, отражающая периодич. закон Менделеева — периодич. зависимость физ. и хим. свойств элементов от их ат. веса (в совр. формулировке — от заряда ядра элемента, т. е. от ат. номера в П. с. э.). Первую П. с. э. Менделеев предложил в 1869, а в 1874 разработал т. н. короткую форму (сходную с совр. П. с. э.), получившую название после того, как были открыты элементы, для к-рых Менделеев оставил в П. с. э. незаполненные клетки. Нов. развитие П. с. э. получила после открытия радиоактивности (1896), изотопии [Ф. Содди (F. Soddy), 1913] и *Моля закона* (1913). Полное научное объяснение П. с. э. осуществлено на основе квантовой механики.

Все известные хим. элементы образуют 8 вертикальных столбцов — *группы* и (табл.), обозначаемых римскими цифрами, все группы состоят из двух подгрупп — *a* и *b* (напр., VII группа делится на подгруппу марганца и подгруппу галогенов); иногда подгруппы *a* и *b* наз. *главной* и *побочной* соответственно. Номер группы в П. с. э. соответствует высшей положит. валентности элемента. Свойства элементов в подгруппах *a* изменяются закономерно. Так, в подгруппе щелочных металлов (Ia) увеличение ат. номера *Z* сопровождается повышением химической активности, тогда как в подгруппе галогенов (VII a) наблюдается обратная зависимость.

Горизонтальные ряды П. с. э. наз. *периодами* и (их 7) и обозначаются араб. цифрами. Внутри каждого периода наблюдается б. или м. равномерный переход от активных металлов через менее активные металлы и слабоактивные неметаллы к очень активным неметаллам и, наконец, к инертным газам.

В каждом периоде, начиная с 4-го, между II и III группами находятся ряды переходных элементов — металлов со сходными хим. свойствами. 15 переходных элементов 6-го периода, начиная с лантана, практически не различимы по свойствам, наз. *лантаноиды* или *редкоземельными элементами*. В 7-м периоде также имеется ряд очень сходных металлов — *актиноидов*.

Структура П. с. э. полностью отвечает порядку заполнения электронных оболочек и слоёв в атомах. Число хим. элементов в периоде равно числу электронов в слое, к-рое определяется в соответствии с *Правилом при-*

цилом, запрещающим существование в атоме электронов в одинаковом квантовом состоянии. Состояние электрона определяют 4 квантовых числа: главное квантовое число  $n = 1, 2, 3, \dots$ , орбитальное (азимутальное) квантовое число  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ , магн. квантовое число  $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$  и спиновое квантовое число  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ . Каждому значению  $l$  соответствуют  $2l+1$  значений  $m_l$ , а каждому значению  $m_l - 2$  возможных значения  $m_s$ . Т. о., замкнутая оболочка, характеризующаяся определёнными значениями  $n$  и  $l$ , содержит  $2(2l+1)$  электронов. Макс. число электронов в слое с определённым  $n$  равно: 
$$\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2.$$

Т. о., замкнутая  $s$ -оболочка ( $l = 0$ ) содержит 2 электрона,  $p$ -оболочка ( $l = 1$ ) - 6 электронов,  $d$ -оболочка ( $l = 2$ ) - 10 электронов и т. д. Число же электронов в слоях (число элементов в периодах)  $c$   $n = 1, 2, 3, 4, \dots$  составляет 2, 8, 18, 32, ... соответственно.

Свойства атомов элементов определяются числом электронов во внеш. электронной оболочке, поэтому элементы, имеющие одинаковое строение внеш. оболочек, принадлежат к одной группе П. с. э. Элементы с замкнутой внеш. оболочкой являются инертными газами. Для лёгких элементов сначала заполняются слои с меньшим, а затем с большим значением  $n$ ; внутри слоя сначала заполняется  $s$ -, затем  $p$ - и т. д. оболочки. В переходных элементах порядок заполнения оболочек и слёв нарушается, т. к. состояния с большими значениями  $n$  могут иметь меньшую энергию, чем состояния с меньшим  $n$  и большим  $l$ . В результате  $s$ -,  $p$ -оболочки застраиваются раньше, чем  $d$ - и  $f$ -оболочки (см. *Атом*). Все переходные элементы являются металлами (в зависимости от застраиваемой оболочки их иногда называют  $d$ - или  $f$ -элементами), входят в 6-подгруппы соответствующих групп П. с. э., их свойства с ростом  $Z$  меняются не резко.

П. с. э. не завершена, конечное число элементов в ней не определено. Элементы с  $Z > 95$  были синтезированы искусственно, время жизни изотопов этих элементов крайне мало. Работы по синтезу и теоретической интерпретации свойств изотопов элементов с  $Z > 107$  продолжаются.

Лит.: Кедров Б. М., Трифионов Д. Н. О современных проблемах периодической системы, М., 1974; Учение о периодичности. История и современность, под ред. Д. Н. Трифионова, М., 1981; Химия и периодическая таблица, под ред. К. Сайто, пер. с япон., М., 1982. В. Г. Давешевский.

**ПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ** - процессы соударения частиц высокой энергии с малой передачей 4-импульса. К ним относятся: упругое рассеяние ядронов, дифракционная диссоциация и неупругие процессы с небольшой множественностью вторичных частиц ( $n \leq 4$ ). Эти процессы можно представить в виде диаграммы (рис.), где внеш. линия а и в соответствуют первичным частицам с 4-импульсами  $p_a$  и  $p_b$ , а с и d - вторичным частицам (или группам частиц) с 4-импульсами  $p_c$  и  $p_d$  [1, 2]. Внутр. линия отвечает обмену лёгкой частицей или полюсом Редже с 4-импульсом  $q$ . Инвариантная величина  $q^2 = (p_a - p_c)^2$  является квадратом передач 4-импульса  $t$  от а к с (или от в к d), а в ф.в. области она оказывается отрицательной. Процессы упругого рассеяния и дифракц. диссоциации ядронов удовлетворительно описываются этой диаграммой, в которой доминирует обмен полюсом (особенно при Померанчука (помероню). Амплитуда рассеяния  $M(s, t)$  для бинарных ( $\pi p \rightarrow \pi^n p$ ,  $p^n p$ , п. т. д.) и неупругих процессов с малой множественностью ( $NN \rightarrow NN_n$ ,  $NN_n \pi$ ;  $\pi N \rightarrow \pi N_n$  и т. д.) имеет полюс при  $t = m^2$ ,  $[M(s, t)] \sim (t - m^2)^{-1}$ , где  $m$  - масса свободной частицы того же типа, за счёт к-рой и осуществляется П. в. (используется система единиц, где  $c = 1$ ).

В частности, обмен пионом или пионным полюсом Редже приводит к наименьшему удалению полюса амплитуды  $M(s, t)$  от ф.в. области и его доминирующему вкладу в П. в. при малых значениях  $t$ .

Анализ эксперим. данных по неупругим процессам с малой множественностью в интервале импульсов первичных ядронов (р,  $\pi$ ) от 4 до 1500 ГэВ/с показывает, что их характеристики описываются диаграммой с обменом пионным полюсом Редже (т. н. модель резежового однополюсного обмена) при  $|t| \leq 10m_\pi^2$  [1]. В совр. кварк-партоных моделях обмен виртуальной частицей трактуется как обмен кварк-антикварковой парой ( $q\bar{q}$ ).

Лит.: 1) Пономарев Л. А. Описание экзотических процессов в модели резежованого однополюсного обмена, *ФЗАН*, 1978, т. 7, с. 186; 2) Тер-Мартirosian K. A., Асимптотика амплитуд неупругих процессов, *Докл.*, 1983, т. 44, с. 341. В. Г. Гришин.

**ПЕРКОЛЯЦИЯ** - см. в ст. *Протекания теория*.

**ПЕРКУССА - ЙЕВИКА УРАВНЕНИЕ** - интегральное ур-ние для парной корреляционной функции  $n_2(r)$  жидкости или плотного газа:

$$n_2(r) e^{\beta V(r)} = 1 - n_1^2 \{ e^{\beta V(r)} - 1 \} [n_2(r - r_1) - 1] [n_2(r_1) - 1],$$

где  $\beta = 1/kT$ ,  $V(r)$  - потенциал взаимодействия между молекулами,  $n$  - плотность числа частиц.

П.-Й. у. предложил Дж. Перкусом (J. K. Percus) и Дж. Йевику (G. J. Yevick) в 1958 и выведено им методом коллективных переменн. Его можно получить на основе теории возмущений для парной коррелц. ф-ции, суммируя определённый класс диаграмм. В ряде случаев П.-Й. у. даёт лучшие результаты, чем *сверх-уравнение*, хотя и учитывает меньшее число диаграмм. П.-Й. у. можно получить также из *Орнштейна - Зернике уравнения* с помощью приближения для прямой коррелц. ф-ции:

$$C(r) = [1 - e^{\beta V(r)}] n_2(r).$$

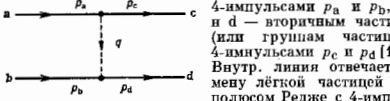
Для потенциала твёрдых фаз П.-Й. у. допускает точное решение, к-рое согласуется с результатами численных расчётов при ср. плотностях, однако при больших плотностях не приводит к фазовому переходу, обнаруженному в машинных экспериментах.

Лит.: Балески Р., Равновесная и неравновесная статистическая механика, пер. с англ., т. 1, М., 1978, гл. 8.

**ПЕТА...** - первая составная часть наименований единиц измерения для образования названия *кратной единицы*, составляющей  $10^{15}$  исходных единиц. Обозначения: П, Р. Пример: ППГц (петагерц) =  $10^{15}$  Гц.

**ПЭС-ДЕТЕКТОР** - координатный детектор частиц, основой к-рого является прибор с зарядовой связью (ПЭС, [1]). Создание детекторов частиц с высоким координатным разрешением - одна из важнейших задач ядерной физики и физики элементарных частиц (см. *Координатные детекторы*). Актуальность этой задачи возросла в связи с открытием семейств короткоживущих частиц (время жизни  $\tau \leq 10^{-12}$  с), содержащих тяжёлые кварки. Регистрации таких частиц по продуктам их распада требует увеличения точности определения координат. Одним из наиб. перспективных управляемых координатных детекторов с электронным съёмом информации является ПЭС-Д. Матрица ПЭС с рабочей площадью  $\sim 4$  см<sup>2</sup> и числом ячеек  $\sim 2,5 \cdot 10^6$  ( $500 \times 500$ ) имеет один выходной канал и позволяет получать для каждой траектории (трена) частицы 2 координаты в одной плоскости, что существенно для многотрассовых процессов с координатным разрешением  $\sigma \sim 1-6$  мкм. Первые ПЭС в качестве координатного детектора предложены в 1980 [2].

Матрица ПЭС представляет собой подложку из полупроводникового материала, на к-рую наносится слой диэлектрика и система электродов (см. *МДП-структура*). При подаче на электроды напряжения под ними в полупроводнике образуются потенциальные ямы для



весновосных носителей (обедненные области). Потенциальные ямы под электродами разделены потенциальными барьерами. Совокупность потенциальных ям (ячейки) образует матрицу. Вводить заряд в ячейку можно термо- или фотогенерацией, а также за счёт свободных носителей заряда, образуемых заряд. Частицы. При подаче на электроды последовательности тактовых импульсов напряжения происходит управляемое перемещение зарядов, накопившихся в потенциальных ямах, вдоль полупроводниковой подложки в выходной регистр и далее в выходное устройство [1].

До прихода управляющего (триггерного) сигнала (см. Триггер) напряжения на ячейках матрицы устанавливаются малые. С помощью внеш. источника света все ячейки матрицы заполняются носителями (избыток уходит в подложку), чтобы потенциальные ямы полностью отсутствовали. В этой ситуации при прохождении частиц образовавшиеся носители диффузионно релаксируются и рекомбинируют (см. Рекомбинация носителей заряда). По триггерному сигналу через  $\sim 100$  нс после регистрируемого события (время «быстрой электроники») на матрицу подаются рабочие напряжения, появляются потенциальные ямы, в к-рые происходит сбор носителей вблизи траектории частицы.

Комбинируя неск. матриц, прослединых вествием мишен, создают т. н. вершинные детекторы [3,4]. По координатам точек прохождения и.я. частиц через ПЗС определяют траектории частиц. Пересечение траекторий позволяет непосредственно наблюдать точку (вершину) траектории, где произошло первичное взаимодействие или распад исследуемых частиц (см. Комбинированные системы детекторов).

Релятивистская частица оставляет в Si (подложке) ок. 110 электрон-дырочных пар на 1 мкм траектории. Сбор носителей заряда осуществляется с глубины потенциальной ямы  $\sim 10$  мкм (пучок частиц направлен перпендикулярно матрице), а также за счёт диффузии с глубины  $\sim 50$  мкм. В результате этого с учётом диффузионного размытия на центр. ячейку приходится  $\sim 1,5 \cdot 10^9$  носителей. Благодаря малой выходной ёмкости ПЗС ( $\sim 0,1$  пФ) этот заряд создаёт на выходе сигнал  $\sim 1$  мВ.

ПЗС обычно состоит из двух независимых секций — накопления и памяти. Пучок частиц падает на секцию накопления. По приходе триггерного сигнала информация за время  $\sim 50$  мкс быстро выносится из области пучка в секцию памяти, откуда поэлементно считывается.

Разрешающее время ПЗС-Д. (точность, с к-рой можно определить момент прохождения частицы через детектор) определяется диффузионным размытием заряда по ячейкам. За счёт диффузионного размытия трека до подачи триггерного сигнала собранный заряд для исследуемой частицы имеет распределение по ячейкам с шириной на половине высоты, равной 3 ячейкам. Для фоновых частиц это распределение имеет др. ширину. Анализируя быстрым процессором на выходе ПЗС ширину распределения, можно определить момент прохождения частицы с точностью до 400 нс при  $T = 300$  К и 100 нс при  $T = 100$  К.

Мёртвое время прибора  $t_m$  определяется временем считывания информации. При тактовой частоте  $f \sim 10$  МГц крупноформатная матрица считывается за время порядка 10 мс, для проектируемых ПЗС с  $f = 1$  ГГц (время  $t_m \sim 0,1$  мс).

Шумы прибора включают шум предусилителя (расположенного на кристалле Si), флукутации фонового заряда, системный шум (нестабильность источника питания и т. д.). Значит, часть шума можно подавить с помощью двойной коррелиров. выборки. Для частоты считывания  $\sim 10$  МГц суммарный среднеквадратичный шум  $\sim 100$  носителей при  $T = 300$  К ( $\sim 50$  носителей при  $T = 100$  К). Отношение сигнал/шум  $\sim 10$ . Эффективность регистрации одиночной релятивистской частицы  $> 98\%$ .

Макс. загрузка детектора определяется кол-вом фоновых частиц за время его чувствительности (время накопления, быстрого сброса в секцию памяти и время считывания). При загрузке  $\sim 10^6$  с<sup>-1</sup> фоновых частиц с учётом т. н. гало пучка ( $\sim 1\%$ ) срабатывает  $\sim 200$  ячеек (0,2% полезной площади), т. е. эффективность регистрации исследуемых частиц практически не изменится.

Диффузионное размытие определяет координатное разрешение — точность локализации точки траектории. Исследуя «центр тяжести» распределения заряда по ячейкам, можно для ячеек размером  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup> получить координатное разрешение  $\sigma = 1 \times 6$  мкм (в зависимости от ширины распределения). Разрешение между треками составляет 40–100 мкм. С увеличением между треками матриц координатное разрешение улучшается в  $1/\sqrt{n}$  раз, где  $n$  — число матриц. Используя 10 матриц, можно измерять т. н. распадающие длины (пути, проходимые короткоживущей частицей до распада)  $\sim 10$  мкм и достигая возможности измерять времена жизни частиц  $\sim 5 \cdot 10^{-16}$  с.

ПЗС применяют для съёма световой информации с искровых и стримерных камер, а также с пропорциональных камер. При этом свет путём переизлучения вводится в сцинтиллирующие волокна и далее в ПЗС. Перспективны сцинтиллят. годокопы и детекторы на волокнах [5]. Свет от таких детекторов усиливается электронно-оптич. преобразователями и выводится на ПЗС. В детекторе на сцинтиллят. волокнах (диам.  $\sim 25$  мкм) получено  $\sigma \sim 20$  мкм при мекрековом разрешении  $\sim 50$  мкм (см. Сцинтилляционный детектор). ПЗС — многоканальная система с аналоговой записью информации; поэтому в детекторах, где требуется обработка большого числа электрич. сигналов (калориметры), можно эти сигналы преобразовать в световые с последующей записью в ПЗС.

ПЗС применяются также для считывания электрич. сигналов с детекторов частиц. Чаще всего это линейные ПЗС, к-рые служат задержками аналоговых сигналов, а также используются, напр., для считывания с полосковых кремниевых детекторов (см. Полупроводниковый детектор).

Лит.: 1) Селен К. Томпсон М. Приборы с переносом заряда, пер. с англ., М., 1978; 2) Головкин С. В., Рыжов В. И., Препринт ИФВЭ 80–10, Серпухов, 1980; 3) Головкин С. В., Рыжов В. И., Препринт ИФВЭ 84–82, Серпухов, 1984; 4) Dallenell C. J. S., Vertex detectors, Rutherford Appleton Laboratory, Preprint RAL–86–077, July, 1986; 5) Kirkby J. A. et al., Today and tomorrow for scintillating fibre detectors, Preprint CERN–EP 87–60, March, 1987.

**ПИ-ИМПУЛЬС** (п-импульс) — импульс эл.-магн. излучения, резонансного двухуровневой квантовой системы, площадь к-рого

$$\theta = (t/h)d_{21} \int_{-\infty}^{\infty} E(t) dt$$

равна  $\lambda$ . Здесь  $E(t)$  — амплитуда импульса,  $d_{21}$  — матричный элемент дипольного момента перехода между состояниями  $|1\rangle$  и  $|2\rangle$  (см. *Двухуровневая система*). Повяте площади применимо к импульсам, длительность к-рых существенно меньше времени продольной ( $T_1$ ) и поперечной ( $T_2$ ) релаксации, когда их взаимодействие с ансамблем двухуровневых систем имеет когерентный характер. В этом случае при условии точного резонанса эволюция двухуровневой системы в эл.-магн. поле можно представить как вращение вектора Блоха  $R$  с пост. длиной вокруг «реактивной» осл. т. е. как вращение, при к-ром изменяется «продольная» компонента  $R_z$  (разность населённостей уровней) и его «активная» составляющая  $\rho$ , ответственная за поглощение (или испускание) эл.-магн. излучения. При этом полный угол поворота вектора Блоха равен  $\theta$ . Т. о., площадь импульса  $\theta$  полностью определяет состояние двухуровневой системы по окончании взаимодействия. В частности, при  $\theta = \pi$  состояние квантовой системы инвертируется: «активная» компонента и разность населённостей принимают значения, равные по величине на-

чалымым и противоположные им по знаку. Под действием  $\mu/2$ -импульса ( $\theta = \pi/2$ ) в первоначально равновесной двухуровневой системе населенности уровней выравниваются ( $w = 0$ ), а абс. величина активной компоненты  $w$  достигает максимума. Если площадь импульса равна  $2\mu l$  ( $2\mu l$ -импульс,  $n = 0, 1, 2, \dots$ ), то по его окончании состояние системы совпадает с начальным.

Представление о площади импульсов играет важную роль в теории резонансного взаимодействия эл.-магн. излучения с веществом, в *радиоспектроскопии, лазерной спектроскопии, нелинейной оптике резонансных сред*. (См. также *Затухание свободной полярзации, Оптическая пучатца, Самоиндуцированная прозрачность, Сплювое зго, Фотонное зго*.) Имеются также обобщения этого понятия на случай *многообъектных процессов*.

Лит.: А л е н Л., Э б е р л Д. Ж., Оптический резонанс и двухуровневые атомы, пер. с англ., М., 1978; М а к о м б е р г Д., Динамика спектроскопических переходов, пер. с англ., М., 1978. К. Н. Дробочук.

**ПИКНОДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ** (от греч. πυκνός — плотный) — ядерные реакции, протекающие в достаточно плотном и холодном (вплоть до  $T = 0$ ) кристаллич. веществе за счёт *нулевых колебаний* реагирующих ядер в узлах кристаллич. решётки. Скорость П. р. не зависит от темп-ры, но зависит от плотности. Для осуществления ядерной реакции прежде всего необходимо, чтобы реагирующие ядра квантовомеханич. образом преодолели кулоновский барьер, обусловленный эл.-статич. отталкиванием ядер. Осн. отличие П. р. от термодерных состоит в том, что в П. р. прохождение сквозь кулоновский барьер осуществляется за счёт нулевых колебаний ядер, а в термодерных — благодаря тепловому движению ядер. При высоких темп-рах реакции идут как термодерные, а при низких — как пикнодерные. Приближённо можно считать, что переход от одного режима к другому происходит при *Дебая температура* кристаллич. решётки  $\theta_D \approx \hbar\omega/k$ , где  $\omega$  — характеристич. частота колебаний ядер в решётке. При  $T \ll \theta_D$  амплитуда колебаний ядра вблизи узла решётки  $g \approx \{h/M\omega\}^{1/2}$ , где  $M$  — масса ядра. Скорость П. р.  $Q$  (кол-во реакций в единице объёма вещества в единицу времени) можно оценить по ф-ле

$$Q \approx n^2 v^2 \sigma P, P \sim \exp(-\gamma), \gamma \sim R^2/r^2. \quad (*)$$

Здесь  $n$  — концентрация ядер,  $R \sim \pi^{-1} a$  — расстояние между соседними ядрами в узлах решётки,  $P$  — коэф. прохождения сквозь кулоновский барьер,  $\sigma = S(\mathcal{E})/S_0$  — сечение ядерной реакции, делённое на коэф. прохождения сквозь барьер при отсчете энергии ядер  $\mathcal{E}$ ,  $S_0(\mathcal{E})$  — астрофиз. фактор, являю зависящий от  $\mathcal{E}$ ,  $v \approx \omega$ . В земных условиях  $\omega$  в порядке нескольких сотых эВ,  $g \lesssim 10^{-8}$  см,  $R \sim 10^{-8}$  см. Поэтому коэф. прохождения сквозь барьер чрезвычайно мал, П. р. идут очень медленно и обычно не играют никакой роли.

П. р. могут быть важны в астрофиз. условиях — в выродившихся ядрах белых карликов и оболочках нейтронных звёзд, где плотность вещества  $\rho$  может достигать  $10^8 - 10^{10}$  г/см<sup>3</sup> при  $T < \theta_D$ . В этих условиях  $\omega$  близка к плазменной частоте колебаний ядер решётки,  $\omega \approx (\Delta n Z^2 e^2 n / M)^{1/2}$ , где  $Z e$  — заряд ядра. Поэтому  $(R/r)^2$  пропорц.  $r^{-1/2}$ , т. е. с ростом плотности вещества вероятность прохождения сквозь барьер растёт и П. р. идут всё более интенсивно. При этом растёт и темп-ра Дебая  $\theta_D \approx 7,8 \cdot 10^3 \sqrt{\rho(Z/A)K}$  ( $A$  — массовое число ядра,  $\rho$  в г/см<sup>3</sup>), благодаря чему расширяется диапазон темп-р, где реакции являются пикнодерными.

Впервые на возможность осуществления П. р. в достаточно холодном и плотном звёздном веществе указал, но-видимому, У. Уайлджек в 1940 [1]. Простой и наглядный модельный расчёт скорости П. р. выполнен Я. В. Зельдовичем (1957) [2]. Наиб. детальный расчёт проделали Э. Соллигер и Х. ван Хорн (1969) [3]. Строгий расчёт  $Q$  очень сложен из-за того, что преодолевая-

мый кулоновский барьер определяется не только реагирующими ядрами, но и соседними ядрами кристаллич. решётки. Для показателя экзистенты в ф-ле (\*), определяющего самую существ. величину  $\gamma$  — коэф. прохождения сквозь барьер, расчёты дают  $\gamma = cZ A^{1/2} \rho^{-1/4}$ , где  $\rho$  в г/см<sup>3</sup>,  $A$  — коэф., к-рый при расчётах в разл. приближениях оказывается равным 180—200. Следует добавить, что скорости П. р. могут значительно возрастать при наличии большого числа дефектов кристаллич. решётки.

Лит.: 1) W i l l i a m s K. W. A., The proton-deuteron transformation as a source of energy in dense stars, «Phys. Rev.», 1940, v. 57, p. 81; 2) З е л ь д о в и ч Я. В., О ядерных реакциях в сверхплотном холодном веществе, «ЖЭТФ», 1957, т. 33, с. 991; 3) S o l l i g e r E. B., V a n H o r n H. M., Nuclear reaction rates at high densities, «Astrophys. J.», 1969, v. 155, p. 183.

Д. Т. Яковлев.

**ПИКО...** (от исп. pico — малая величина) — первая составная часть наименования единицы измерения для образования названия *дольной единицы*, составляющей  $10^{-12}$  от исходной. Обозначения: п, р. Пример: 1 пф (пикофарада) =  $10^{-12}$  Ф.

**ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ СПЕКТРОСКОПИЯ** — совокупность методов оптич. спектроскопии, в к-рых используются световые импульсы пикосекундной ( $\sim 10^{-12}$  с) длительности. С получением ещё более коротких импульсов (фемтосекундных,  $\sim 10^{-16}$  П. и. с. развивалась *фемтосекундная спектроскопия*.

**ПИ-МЕЗОНЫ** ( $\pi$ -мезоны, пионы) — группа сильно взаимодействующих элементарных частиц (адронов), в к-рую входят две противоположно заряженные ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ) и одна нейтральная ( $\pi^0$ ) частицы. Пионы обладают массой, промежуточной между массами протона и электрона, в связи с чем и были названы мезонами (от греч. mesos — средний, промежуточный). Пионы являются связанными состояниями пар кварков и антикварков:  $\pi^+$  образован парой ( $u, \bar{d}$ )-кварков,  $\pi^-$  — парой ( $\bar{u}, d$ ), в  $\pi^0$  в равных пропорциях входят ( $\bar{u}, u$ -) и ( $\bar{d}, d$ )-пары кварков.

**Основные характеристики и квантовые числа пионов.** Масса, времена жизни и осн. способы распада пионов приведены в таблице.

Частич.	Масса $m_0$ , МэВ	Время жизни, $\tau$ , с	Способы распада	Вероятность распада, %
$\pi^\pm$	139,5685(10)	$2,6030(23) \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ $e^+ + \nu_e(\bar{\nu}_e)$ $\mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + \gamma$ $e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \gamma$ $e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \pi^0$	99,98 $1,23 \cdot 10^{-4}$ $\sim 10^{-5}$ $\sim 10^{-5}$ $1,0 \cdot 10^{-4}$
$\pi^0$	134,9642(38)	$0,87(4) \cdot 10^{-16}$	$\gamma + \gamma$ $\gamma + e^- + \bar{e}^-$ $e^+ + e^- + e^+ + e^-$	98,50 1,8 $3,2 \cdot 10^{-4}$

Т. к. время жизни пионов велико по сравнению с ядерным временем ( $\sim 10^{-23}$  с), в табл. элементарных частиц их условно относят к стабильным частицам. Электр. заряд  $\pi^-$ -мезона  $Q = -1$  (т. е. совпадает зарядом электрона), для  $\pi^+$ -мезона  $Q = +1$ , для  $\pi^0$ -мезона  $Q = 0$ . Спин пионов  $J = 0$ , т. е. они относятся к классу бозонов. Их *внутренняя чётность* отрицательна,  $P = -1$ . Частицы с такими характеристиками спина и чётности ( $J = 0, P = -1$ ) наз. псевдоскалярными: *барионное число, лептонное число, странность, очарованность, красота* пионов равны нулю. Из кваркового состава пионов видно также, что  $\pi^+$  и  $\pi^-$  являются частицей и античастицей по отношению друг к другу, а  $\pi^0$  тождествен своей античастице (т. е. является *истинно нейтральной частицей*);  $\pi^0$ -мезон имеет положит. *зарядовую чётность*:  $C = +1$ . *Изотопический спин* пионов  $I = 1$ , т. е. они образуют изотопич. триплет: трём возможным проекциям изотопич. спина  $I_3 = +1, 0, -1$  соответствуют состояния  $\pi^+, \pi^0, \pi^-$ ,  $G$ -чётность пионов отрицательна,  $G = -1$ .

Пионы — наиб. лёгкие в обширном классе адронов, что обуславливает их особую роль среди элементарных частиц. Облако виртуальных л-мезонов, окружающих адроны, определяет размеры адронов, составляющих в соответствии с неопределённой соотношением величину  $\hbar/m\pi c \sim 10^{-13}$  см.

Распады пионов. Пионы участвуют во всех известных типах взаимодействий: сильном, электромагнитном, слабом и гравитационном. Поскольку л-мезоны имеют памятную массу среди адронов, их распад на более лёгкие частицы не может происходить за счёт сильного взаимодействия и связан с появлением др. взаимодействий. Способы распада пионов определяются их квантовыми числами. Распад  $\pi^0$  происходит за счёт эл. магн. взаимодействия и из-за сохранения зарядовой чётности в этом взаимодействии возможен лишь на чётное число фотонов (фотон имеет отрицат. зарядовую чётность). Сохранение элктр. заряда требует, чтобы при распаде заряженного  $\pi^\pm$ -мезона его заряд компенсировался присутствием среди продуктов распада заряд. лептона ( $\mu^\pm$  или  $e^\pm$ ). В свою очередь сохранение лептонного числа требует появления  $\mu^\pm$  или  $e^\pm$  в паре с соответствующим типом нейтрино (антинейтрино), так чтобы их суммарное лептонное число равнялось нулю (табл.). Обязат. присутствие среди продуктов распада  $\pi^\pm$ -мезонов слабо взаимодействующей частицы — нейтрино (антинейтрино) означает, что распад  $\pi^\pm$  обусловлен слабым взаимодействием. Это приводит к относительно большому (по сравнению с  $\pi^0$ ) времени жизни адр. пионов.

Процессы образования пионов. Пионы являются осн. продуктом сильного взаимодействия адронов при высоких энергиях. По этой причине пионы в значит. степени определяют состав космических лучей в пределах земной атмосферы. Будучи осн. продуктами ядерных взаимодействий частиц первичного космич. излучения (протоны и более тяжёлых ядер) с ядрами атомов воздуха, пионы входят в состав электронно-ядерных и широких атм. ливней. Распадаясь,  $\pi^\pm$ -мезоны создают проникающую компоненту космич. излучения — мюоны и нейтрино высоких энергий, а  $\pi^0$ -мезоны — электронно-фотонную компоненту.

Искусств. путём пионы получают на ускорителях. Благодаря сравнительно большому времени жизни из релятивистских заряд. пионов можно сформировать пучки и отвести их на значит. расстояние от точки образования пионов. При взаимодействии ускоренных протонов с ядрами на совр. ускорителях заряд. частиц можно получить пучки пионов с энергией до неск. сотен ГэВ. Продукты распада нейтральных пионов используются для получения лучков высокоэнергетичных  $\gamma$ -квантов, электронов и позитронов. Потоки пионов, получаемые на мезонных фабриках — высокоинтенсивных ускорителях средних энергий ( $\leq 1$  ГэВ), могут превышать в пучке  $10^{10}$  пионов/с.

История открытия. Существование пионов было постулировано Х. Юкавой (H. Yukawa) в 1935 для объяснения короткодействующего характера и большой величины ядерных сил. Из соотношения неопределённости для энергии и времени следовало, что если действующее между нуклонами в ядре силы обусловлены обменом квантами поля ядерных сил, то масса этих квантов (позднее названных л-мезонами) должна составлять примерно 300 электронных масс. Поиски заряд. л-мезонов увенчались успехом лишь в 1947, когда Дж. Латтесом (G. Lattes), Х. Мьюирхедом (H. Muirhead), Дж. Оккаллини (G. Occhialini) и С. Ф. Пауэллом (S. F. Powell) были найдены в ядерных фотоэмulsionах, облучённых космич. лучами на большой высоте над поверхностью Земли, треки частиц, свидетельствующие о распаде  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  (рис. 1).

Существование нейтральных пионов следовало из обнаруженной на опыте зарядовой независимости ядерных сил (взаимодействие между одинаковыми нуклонами — двумя протонами или двумя нейтронами — может

осуществляться только путём обмена нейтральными пионами). Экспериментально л<sup>0</sup>-мезоны были обнаружены в 1950 по  $\gamma$ -квантам от их распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ ;  $\pi^0$  рождался в столкновениях фотонов и протонов с энергией  $\sim 300$  МэВ с ядрами. Заряд. пионы в лаб. условиях были впервые получены в 1948 на ускорителе в Беркли (США). Облада. массой, пионы требуют для своего рождения затраты энергии, не меньшей их энергии покоя  $m_0c^2$ . Так, для рождения пиона при столкновении двух нуклонов,  $N + N \rightarrow N + N + \pi$ , необходимо, чтобы кинетич. энергия нуклона (в лаб. системе), налетающего на покоящийся нуклон, была выше пороговой энергии  $\epsilon_p = 292$  МэВ; для фоторождения пиона на нуклоне,  $\gamma + N \rightarrow \pi + N$ ,  $\epsilon_p \approx 150$  МэВ.

Взаимодействие пионов. Количество изученных свойств пионов и их взаимодействий выполнено преим. на пучках частиц высоких энергий



Рис. 1. Фотография одного из первых зарегистрированных в ядерных фотоэмulsionах случаев распада  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ .

на ускорителях. Нейтральные пионы в силу малого времени жизни, как правило, распадаются до взаимодействия в веществе. Заряд. пионы с энергией  $\sim 10$  МэВ и ниже при движении в веществе тратят

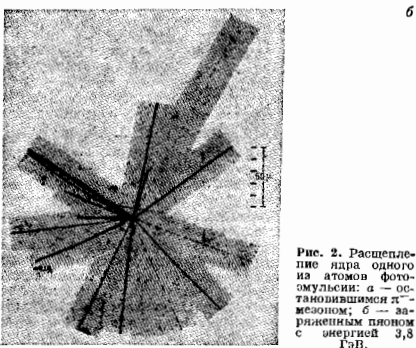
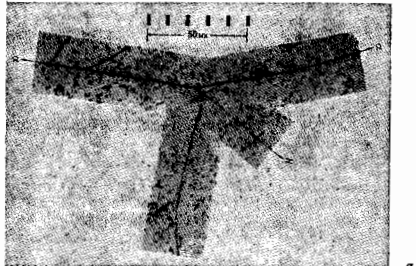


Рис. 2. Расщепление ядра одного из атомов фотоэмulsionа: а — остановившийся  $\pi^-$ -мезон; б — зарядившийся пион с энергией 3,3 ГэВ.

свою энергию в основном на ионизацию атомов (за счёт эл.-магн. взаимодействия с ними) и обычно не успевают до своей остановки провзаимодействовать с атомными ядрами. При этом остановившийся  $\pi^-$ -мезон распадается на положительно заряженный мюон и мюонное нейтрино.  $\pi^-$ -мезон после остановки притягивается положит. зарядом ближайшего ядра, образуя  $\pi^-$ -мезоатом (см. *Адронные атомы*) с размерами в  $m_e/m_\pi \approx 270$  раз меньшими, чем размеры обычного атома, а затем поглощается и расщепляет ядро с образованием т. п. звезды (рис. 2, а).  $\pi^-$ -мезоны с энергиями  $\geq 100$  МэВ сильно взаимодействуют с атомными ядрами, вызывая, как правило, их расщепление (рис. 2, б).

В области энергий выше порога мезообразования и до  $\sim 10^{10}$  эВ при взаимодействии пионов с протонами или нуклонами ядер наблюдается интенсивное образование кваисвязанных мезонных и барьонных систем, т. н. *резонансов*, с временем жизни  $10^{-22} - 10^{-24}$  с. Эти состояния могут проявляться, напр., в виде максимумов в энергетич. зависимости полных или дифференц. сечений реакций рассеяния пионов (рис. 3). Неудругие взаимодействия пионов с энергией  $\geq 10^{10}$  эВ обусловлены преим. процессами множеств. рождения частиц (см. *Многостепенные процессы*). Процессы рассеяния адронов (в т. ч.

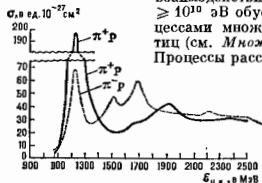


Рис. 3. Зависимость полных сечений от взаимодействий  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов с протонами от полной энергии  $E_{\text{ц.м.}}$  стандартной системы частиц в системе центра инерции.

пионов) высоких энергий с большой вероятностью импульса (*глубоко неупругие процессы*) описываются на основе *квантовой хромодинамики*. Исследование процессов глубоко неупругого рассеяния пионов позволяет определить т. н. структурную функцию, характеризующую распределение по импульсам кварков антикварков (партонов), входящих в состав рассеивающегося пиона (рис. 4).

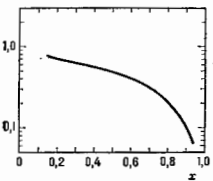


Рис. 4. Структурная функция заряженных пионов, характеризующая распределение входящих в пион кварков (партонов) в зависимости от относительной доли  $x$  полного импульса пиона.

Теоретич. описание процессов сильного (и эл.-магн.) взаимодействия пионов промежуточных и низких энергий носит феноменологич. характер. Основой теоретич. описания процессов взаимодействия и распада адронов низких энергий с участием пионов является т. н. *киральная симметрия*, справедливая в приближении равенства нулю массы псевдоскалярных мезонов (пионов).

Взаимодействие пионов с  $\gamma$ -квантами определяется их эл.-магн. свойствами — электрич. зарядом, эл.-магн. радиусом, формфактором, поляризуемостью. Эл.-магн. характеристики пионов были определены в спец. опытах, в к-рых изучались редкие процессы рассеяния пионов высоких энергий на атомных электронах и на кулоновском поле атомных ядер. Найденное значение эл.-магн. радиуса заряженных пионов составляет  $0,66, (0,01) \cdot 10^{-13}$  см, поляризуемости  $\alpha_\pm = 6,9, (1,4) \cdot 10^{-43}$  см<sup>3</sup>. Взаимодействие фотонов с адронами при энергиях выше  $\sim 150$  МэВ определяется в основном процессами фоторождения пионов.

**Использование пионов.** Реакции взаимодействия и распада пионов служат ценным источником информации не только о свойствах пионов, но и об общих закономерностях взаимодействий элементарных частиц. В качестве примеров можно привести следующие. Измерения отношения вероятностей распадов  $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$  и  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  были использованы для проверки предположения М. Гелл-Манна (М. Gell-Mann) и Р. Фейнмана (Р. Feynman), а также Р. Маршака (R. Marshak) и Э. Сударшана (E. Sudershan) о векторно-аксиальном ( $V - A$ ) варианте гамилтониана слабого взаимодействия. Открытие бета-распада пиона  $\pi^+ \rightarrow l^0 + e^+ + \nu_e$  (Ю. Д. Прокошкин и др.) явилось эксперим. подтверждением сформулированной С. С. Герштейном и Я. Б. Зельдовичем гипотезы о сохранении векторного тока в слабом взаимодействии (см. *Векторное токи сохранения*). Теоретич. объяснение эксперим. значения вероятности распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$  в кварковой теории оказалось возможным лишь при использовании предположения о том, что кварки обладают квантовым числом *цвет*. Исследование спектра эфф. масс и распределений по углам вылета системы из трёх  $\pi^-$ -мезонов, образованных в результате *дифракционного рассеяния*  $\pi^-$ -мезона на ядрах (т. е. рассеяния без изменения состояния ядра-мишени), привело к обнаружению новых мезонов — резонансных состояний с массами 1240(30) МэВ и 1770(30) МэВ и квантовым числом, совпадающим с квантовым числом пионов. Эти состояния, называемые  $\rho'$ - и  $\rho''$ -мезонами, интерпретируются как радиальные возбуждения системы из двух кварков, входящих в пион (А. А. Тлупкин и др.).

Интенсивные пучки  $\pi^-$ -мезонов средних энергий, получаемые на мезонных фабриках, начинают применять в прикладных целях, в частности в лучевой терапии злокачеств. опухолей. Наиб. эффект даёт использование  $\pi^-$ -мезонов, т. к. дополнит. энерговыделение, связанное с расщеплением ядер при поглощении ими остановившихся  $\pi^-$ , может быть хорошо локализовано в поражённом органе. Медленные заряж. пионы, и особенно образующиеся при их распаде мюоны, используются для изучения структуры вещества (см. *Мезонная химия*).

*Лит.*: Росс В. В., Частицы больших энергий, пер. с англ., М., 1955; Гаврилов В. Ч., Физика элементарных частиц, пер. с англ., М., 1969; Ливинг и Д., Введение в физику высоких энергий, пер. с англ., М., 1975; Окумь Л. В., Липтон и кварки, 2 изд., М., 1990. А. И. Лебедев, Г. В. Мичельмаксер.

**pin-диод** — полупроводниковый диод, в к-ром центральная (базовая) область легирована настолько слабо, что уже при небольшом обратном смещении она полностью перекрывается областью пространственного заряда (ОПЗ) *p-n-перехода*.

Обычно этот прибор является *rvn-* либо *rvn-диодом*, где *v*, л означают слаболегиров. материал *n-* либо *p-*типа проводимости. Материал с собств. проводимостью (*i-*материал; от англ. *intrinsic* — собственный) может быть получен только путём точной взаимной компенсации легирующих ирмисей; технологически такая компенсация весьма сложна и применяется редко.

Используются *pin-диоды* обычно в качестве переключателей, аттенуаторов, ограничителей и модуляторов СВЧ-колебаний, а также в качестве быстродействующих фотоприёмников и мощных выпрямит. диодов.

Общим свойством *pin-диода*, к-рое используется при всех видах управления СВЧ-сигналом, является сильное изменение его проводимости под воздействием влещ. управляющего источника напряжения (тока). Такой диод включается в СВЧ-тракт, и путём изменения его проводимости производится изменение прохождения, отражения либо поглощения СВЧ-мощности. Увеличение проводимости осуществляется *инжекцией* неосновных носителей *p- i- и n- i-*переходами при смещении их в прямом направлении, а уменьшение — выведением носителей во влещ. цепь при обратном смещении и рекомбинацией.

При резком приложении прямого смещения *p-n-переход* (рис. 1, 2) инжектирует дырки в базу, их пол-

притягивает электроны, в результате чего у перехода образуется тонкий слой  $P_1$  ал.-нейтральной электроно-дырочной плазмы. Протекающий электронный ток создает в базовой области поле, вытравливающее из слоя  $P_1$  дырки. Эти дырки с компенсирующими их электронами движутся к  $n$ -слою в условиях биполярного дрейфа при промежуточном уровне инжек-

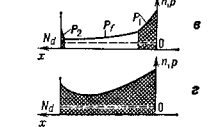


Рис. 1. pin-диод: а — структура; б — формирование плазменного слоя  $P_1$  и концентрации волны  $P_2$  на начальной стадии включения; в — формирование слоя  $P_2$ ; г — вазистационарное распределение плазмы после снятия диффузионных слоев.

ции, т. е. формируется плазменная концентрация, волна  $P_1$  быстро достигающая  $n$ -слоя; после этого у его границы начинается формирование ал.-нейтральной плазменного слоя  $P_2$ . Одновременно с быстрым биполярным дрейфом идет сравнительно медленное встречное диффузионное движение плазменных слоев  $P_1$  и  $P_2$ , после смыкания к-рых в базе через определ. время формируется стационарное распределение плазмы.

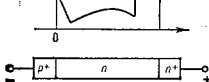


Рис. 2. Распределение концентрации плазмы (а) и напряженности поля (б) при переключении диода на дрейфовую стадию накопления.

Характерные времена процессов биполярного дрейфа лежат в наносекундном, а времена диффузионных процессов — в микросекундном диапазонах ( $\approx W^2/2D$ , где  $D$  — коэф. амбиполярной диффузии,  $W$  — ширина базы); однако биполярный дрейф идет при концентрации носителей, не сильно превышающей уровень легирования, а для диффузионных процессов превышение обычно составляет 2–3 порядка и более.

Характер процесса восстановления диода при переключении на обратное смещение существенно зависит от того, на какой стадии был прерван процесс накопления плазмы при прямом смещении. Если длительность накопления была достаточна для «скопления» диффузионных слоев, то восстановление протекает довольно медленно. Дырки из плазмы у  $p-n$  перехода выводятся в  $p$ -слой, а электроны движутся к  $n$ -слою в слабом поле, создаваемом протекающим через плазму практически постоянным обратным током; одновременно идет рекомбинация носителей в плазме. После спада концентрации дырок у  $p-n$  перехода до равновесного значения начинает формироваться ОПЗ, граница  $n$ -рой смещается к  $n$ -слою со скоростью движения электронов в слабом поле; ток в цепи падает, а напряжение на диоде возрастает. Затем ОПЗ занимает весь базовый слой, избыточные носители полностью удаляются из базы, и процесс переключения заканчивается; длительность такого процесса лежит обычно в микросекундном диапазоне. Характер процесса радикально меняется, если переключение производится на дрейфовую стадию накопления. В этом случае тонкий слой плазмы  $P_2$  истекает очень быстро и у  $n$ -слоя формируется фронт концентрации, волны,  $n$ -рый в условиях биполярного дрейфа отходит от  $n$ -слоя, оставляя после себя область с концентрацией электронов, определяемой исходным легированием. Поскольку при биполярном дрейфе скорость носителей тем больше, чем меньше концентрация, то крутизна заднего фронта при движении

возрастает. Одновременно идет рассеивание плазмы и образование ОПЗ у  $p-n$  перехода, причём момент подхода фронта к плазменной области  $P_1$  совпадает с её полным истощением, и далее ОПЗ расширяется очень быстро за счёт ухода осн. носителей в поле, создаваемое в нейтральной  $n$ -базе обратным током. Т. о., база легирована слабо, что даже при небольшом токе поле достаточно велико, для того чтобы носители и, следовательно, ОПЗ двигались с насыщенной скоростью; тогда длительность процесса восстановления составляет единицы нс и менее. Поэтому при дрейфовом характере процессов включения и выключения быстротейшее  $pin$ -диола очень велико, но концентрация плазмы в базе и, следовательно, проводимость её во включённом состоянии сравнительно невелики, то в время как диффузионные процессы позволяют обеспечить высокую проводимость, но протекают апатительно медленнее. Для управления сравнительно небольшой СВЧ-мощностью, особенно в приёмных трактах, используются низковольтные  $pin$ -диоды с тонким базовым слоем. В этом случае достаточное быстротейшее обеспечивают диффузионные процессы, позволяющие осуществить очень большие передачи концентрации и, следовательно, проводимости. При этом время жизни носителей в базе должно быть малым, но для приемлемой однородности распределения концентрации плазмы необходимо, чтобы выполнялось соотношение  $W(D\tau)^2 \leq 1$ , где  $\tau$  — время жизни носителей в базе. Для управления СВЧ-сигналами большой мощности используются высоковольтные  $pin$ -диоды с широкой базой, работающие в осн. на дрейфовых процессах.

Следует отметить, что форма импульса тока через диод и форма импульса СВЧ-мощности в модуляторе могут не совпадать, поскольку проводимость диода существенно зависит от целого ряда нелинейных эффектов, возникающих при большой плотности тока и большой концентрации плазмы. Напр., в области больших плотностей тока рост проводимости диода с ростом тока и, следовательно, ослабление СВЧ-мощности насыщаются из-за падения коэф. инжекции переходов уменьшения подвижности носителей из-за электроно-дырочного рассеяния и увеличения темпа их рекомбинации из-за оже-процессов. С др. стороны, при переключении диода из прямого смещения на обратное при относительно небольших плотностях тока ослабление СВЧ-мощности начинает уменьшаться практически сразу, хотя постоянный обратный ток протекает довольно долго. Это связано с уменьшением проводимости областей, прилегающих к  $p-n$  переходам, из-за выведения носителей во внеш. цепь.

При прямом смещении и высокой концентрации плазмы в базе сопротивление диода можно считать чисто активным независимо от величин СВЧ-сигнала, но при малой либо нулевой концентрации приходится учитывать, что при непрерывном воздействии СВЧ-сигнала у  $p-n$  переходов возникает избыточная концентрация неравновесных носителей, осциллирующая около некоторой постоянной составляющей. Поведение этой составляющей аналогично поведению избыточных носителей, инжектированных в базу при прямом смещении. Это означает, что избыточная концентрация распространяется путём диффузии либо биполярного дрейфа на всю базу, выпывая её проводимость; поэтому при достаточной мощности СВЧ-сигнала проводимость диода увеличивается даже без воздействия управляющего смещения.

Диапазон параметров совр.  $pin$ -диодов, предназначенных для управления СВЧ-мощностью, очень широк. Сравнительно маломощные диоды с макс. мощностью рассеяния  $< 1$  Вт имеют времена переключения в наносекундном диапазоне. Мощные диоды (рассеиваемая мощность  $\sim 10$  Вт) коммутируют импульсную СВЧ-мощность ( $\sim 10$  кВ) с временами переключения в микросекундном диапазоне. Осн. материалами для этих приборов являются кремний, германий и арсенид гал-

лия, осн. технол. методами изготовления — диффузия, сплавление, эпитаксия и ионная имплантация.

Вторая важная область применения  $\text{pin}$ -диодов — оптоэлектроника, где они используются в качестве высокочувствительных быстродействующих фотоприёмников. На рис. 3 показана фоточувствительная  $p^+(i\nu)n^+$ -структура при обратном смещении, величина  $k$ -рого выбирается такой, чтобы ОПЗ  $p^+ - \nu$ -перехода занимала всю базу. Падающее на прозрачное окно фотодиода излучение  $I_0$  с незначит. потерями в  $p^+$ -слое достигает  $i(i\nu)$ -базы, в к-рой поглощается с генерацией электронно-дырочных пар.

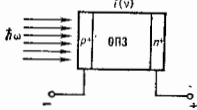


Рис. 3.  $p^+(i\nu)n^+$ -структура фотодиода.

Пары разделяются в поле ОПЗ и дрейфуют к соответствующим электродам, вызывая появление фототока. Предельное быстродействие  $\text{pin}$ -фотодиода ограничивается временем пролёта носителей  $i(i\nu)$ -базы с насыщенной скоростью, а предельная чувствительность — шумовым током. Осн. материалом для  $\text{pin}$ -фотодиодов являются кремний, осн. технол. методами изготовления — планарно-эпитаксиальные.

$p^+(i\nu)n^+$ -структура лежит в основе конструкции полупроводникового элемента совр. выпрямит. диодов большой мощности, в к-рых толщина  $i(i\nu)$ -базы выбирается так, чтобы ОПЗ  $p^+ - \nu$ -перехода занимала всю толщину базы при напряжении лавинного пробоя, соответствующем уд. сопротивлению материала базы. Такая геометрия позволяет сочетать высокое блокируемое напряжение с относительно малым напряжением в проводящем состоянии при большой плотности тока, определяемой в осн. толщиной базы и временем жизни носителей в ней. Однако при этом необходимо использовать спец. конструкцию краевого контура  $p - n$ -перехода, препятствующую смыканию ОПЗ  $p^+ - \nu$ -перехода с  $k^+$ -контактом на поверхности полупроводника, граничащей с окружающей средой.

Лит.: Д а е х д р Г. В., О р л о в О. С.,  $\text{pin}$ -диоды в микрополосных устройствах СВЧ, М., 1978; Н о с о в Ю. Р., Оптоэлектроника, 2 изд., М., 1982; Т у н к а в и ч В. М., Г р е х о в И. В., Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами, Л., 1988. И. В. Грехов.

**ПИНЧ-ЭФФЕКТ** (от англ. pinch — сужение, сжатие) — эффект сжатия, стигвания сильноточного газового разряда (плазменного образования) в результате взаимодействия тока разряда с магн. полем, собственным или внешним. Впервые подобное явление описано в 1934 У. Беннеттом (W. H. Bennett) применительно к потокам быстрых заряд. частиц газоразрядной плазме. Термин «П.-э.» введён в 1937 Л. Готтсом (L. Tonks) для описания физ. процессов в сильноточной дуге.

В зависимости от направления тока в плазменном столбе различают  $z$ - и  $\theta$ -пнч. Если ток  $I$  протекает вдоль оси  $z$  цилиндра плазменного столба и взаимодействует с собственным магн. полем, П.-э. наз.  $z$ -пнчем. Если  $I$  цилиндрич. разрядной камере приложено внеш. продольное магн. поле, то в плазме индуцируется азимутальный ток  $I_\theta$ , в результате взаимодействия  $I$ -рого с внеш. магн. полем происходит стигвание плазмы к оси —  $\theta$ -пнч. Сжатие плазмы наблюдается и в конфигурациях, имеющих вид тонкого лобового плазменного слоя с током — нейтральной токовой слои.

Механизм П.-э. можно рассмотреть на примере  $z$ -пнча. Силовые линии магн. поля  $B$ , создаваемого током, имеют вид концентрич. окружностей, плоскости к-рых перпендикулярны осн. Возникающая электродинамич. сила  $F$ , действующая на единицу объёма проводящей среды с плотностью тока  $J$ , равна  $c^{-1}[J]B$ , направлена по радиусу к осн цилиндра и вызывает сжатие токового канала. Сжимающее действие протекающего тока можно считать также простым следствием закона Ампера о магн. притяжении отд. параллельных токов

вхх иттей с одинаковым направлением, создающих полный ток  $J$ .

При описании П.-э. в терминах магн. гидродинамики для случая идеально проводящей среды объёмная электродинамич. сила  $F$  может быть заменена на поверхность магн. давление  $p_{\text{магн}} = B^2/8\pi$ , к-рому в случае П.-э. в металлах, проводящих противдействует сила упругости, а при сжатии газоразрядной плазмы — газокинетич. давление, обусловленное тепловым движением частиц — ионов и электронов.

При нек-рой величине тока магн. давление на поверхности подоживой, легко сжимаемой газовой среды (плазмы) может стать больше газокинетического и токовый канал начнёт уменьшать своё сечение — возникает П.-э.

П.-э. может наблюдаться только в проводящих средах, где подвижные носители заряда (электроны и ионы в газоразрядной плазме, электроны и дырки — в полупроводниках) присутствуют в приблизительно одинаковом кол-ве. Если не имеется только один тип носителей тока, то электр. поле пространственного заряда эффективно препятствует сжатию тока к осн. Прохождение больших токов ( $10^6 - 10^8$  А) через газ сопровождается ионизацией и нагревом вещества и переходом его в состояние плазмы. Нагрев плазмы происходит при токовом тепловыделении на омич. сопротивлении плазменного канала (джоулев нагрев) и при адиабатич. сжатии пнча как целого (образуется высокотемпературная плазма).

Магн. поле тока отжимает плазменный канал от стенок разрядной камеры, и образуется изловрон. токовый шпур — пнч. Само магн. поле сосредоточено в пристоичном вакуумном зазоре между пнчем и стенкой, тем самым создаются условия для магн. термомоноизоляции высокотемпературной плазмы. Линии магн. поля параллельны поверхности пнча, и вылетающие из плазмы заряд. частицы движутся поперек магн. поля, процесс диффузии плазмы (и переноса тепла) на стенку существенно замедляется; характерная длина свободного пробега частиц  $\lambda$  заменяется на ларьоновский радиус  $\rho = emv/B$ , к-рый, в зависимости от величины магнитного поля  $B$ , меньше  $\lambda$  на несколько порядков величины.

Этим свойством пнчей — магн. термомоноизоляции высокотемпературной плазмы — объясняется возникший в связи с проблемой УТС интерес к П.-э. Исследование пнчей в действии началось в 50-х гг. одновременно в СССР, США и Великобритании в рамках спец. программы по УТС. Осн. внимание при этом уделялось двум типам пнчей — линейному и тороидальному.

Ток пнча  $J$  должен был выполнять ещё одну необходимую для УТС ф-цию — обеспечивать магн. удержание пнча в состоянии равновесия. Неограниченному магн. сжатию при П.-э. противодействует газокинетич. давление плазмы  $p_{\text{пл}} = n_e k T_e + n_i T_i$ , к-рое в плотной высокотемпературной плазме в силу её квазинейтральности ( $n_e = n_i = n$ ) и обычно выполняющегося условия  $T_e = T_i$  становится равным  $p_{\text{пл}} = 2nkT$  ( $n$  — плотность, а  $T$  — температура плазмы). При равновесии легкоподвижная граница пнча располагается на поверхности равного давления, т. е. после нек-рого нач. сжатия на границе плазменного образования должно непрерывно выполняться условие квазирравновесия пнча  $p_{\text{пл}} = p_{\text{магн}} = B^2/8\pi$ .

Из этого условия следует т. в. соотнош. н е Беннетта  $B^2/8\pi = 2nkT$ . Т. к. для цилиндрич. проводника  $B = 2J/cr$ , то  $J^2 = 4c^2 k n T r$ , где  $N = \pi r^2 n$  — число частиц в сечении пнча. Это соотношение показывает, что для достижения в терме  $T \approx 10^8$  К, при к-рой скорость протекания термоядерных реакций в равнокомпонентной дейтерий-тритиевой смеси уже настолько велика, что синтез ядер может стать энергетически выгодным, требуется хотя и большой, но вполне достижимый ток пнча ( $\approx 10^8 - 10^7$  А, в зависимости от  $N$ ).



Исследования линейного (цилиндрич.) z-пинча проводились в двухэлектродных керамич. камерах. Разрядная камера состояла из изолирующей трубы (фарфор, кварц), торцы к-рой вакуумно-плотно закрывались металлич. электродами. Камера заполнилась дейтерием при давлении  $10^{-3}$  тор, и через газ пропускался импульсный ток  $(10^4 \pm 10^6)$  А, источником к-рого служила малоиндуктивная конденсаторная батарея (напряжение зарядки  $10^3 \sim 10^5$  В), выключаемая через разрядное устройство. Протекающий через газ ток изменялся во времени по закону, близкому  $J_z \sin t / \sqrt{LC}$ , где  $C$  — ёмкость конденсаторного накопителя,  $L$  — эфф. индуктивность, состоящая из внеш. индуктивности контура и изменяющейся во времени индуктивности плазменного столба. Скорость нарастания тока достигала величины  $\leq 10^{12}$  А/с. В первых же экспериментах по исследованию z-пинча выяснились две главные не учитывавшиеся ранее особенности сильноточного газового разряда.

При изменяющемся во времени токе плазменный шпур скиндрится (см. *Скин-эффект*), и в нагрете плазмы существенным оказывается не джоулево тепловыделение, а электродинамич. ускорение тонкой токовой оболочки (скин-слоя) к оси, сопровождающееся образованием мощной сходящейся ударной волны. Движение токово-плазменной оболочки происходит при  $R_{\text{маг}} > R_{\text{пл}}$  и определяющую роль в движении играют силы инерции; условия нагрева в ударной волне и при кумуляции на оси в результате перехода кинетич. энергии в тепловую оказались более выгодными, во всяком случае равновесия пинча не обеспечивались. Оказалось также, что в линейном z-пинче с резкой границей плазма — магн. поле в принципе невозможно получить равновесия пинча из-за развивающихся плазменных неустойчивостей (см. *Неустойчивости плазмы* и *Магнитные лодушки*). Эта особенность сильноточного разряда связана с крайне высокой подвижностью и неравновесностью коллектива частиц, составляющих плазменную среду, и отсутствием внутр. «жёсткости» у плазмы, способствующей сохранению пинчем устойчивой формы. Более того, при сжатии магн. полем диаметра, свойства плазмы способствуют выталкиванию её целиком (или отд. её частей) из области с большим  $B$  в сторону уменьшающегося поля.

В экспериментах наблюдалась сначала первая фаза — сжатие плазмы к оси, при к-ром diam. токового канала уменьшался в  $\sim 10$  раз и на оси камеры образовывался ярко светящийся плазменный шпур, а затем вторая — быстрое развитие плазменных неустойчивостей токового канала — возникали местные пережатия пинча («перетяжки», «шейки»), его впадины, витовые возмущения и т. д. Нарастание этих неустойчивостей происходит чрезвычайно быстро и ведёт к разрушению пинча — выбрасыванию плазменных струй, разрывам пинча, образованию вихрей и т. д. В результате возникает условия, при к-рых ток не сжимает плазму, как следовало бы из соотношения Беннета, а перехватывается образующейся околоницовой плазмой или шунтируется вследствие призоляторных пробоев.

В 1952 Л. А. Арцимовичем, М. А. Леонтовичем с сотрудниками была обнаружена одна из наиб. интересных особенностей линейного П.-э. в дейтерия, связанная с развивающимися неустойчивостями. При определённых условиях мощный импульсный z-пинч в разреженном дейтерии становится источником жёсткого рентг. излучения и нейтронов, происхождение к-рых не могло быть объяснено термоядерным механизмом. Разрушение пинча неустойчивостями ограничивает время жизни высокотемпературной плазмы, поэтому в линейном пинче оказывается нерешаемым достижение *Лоусона критерия* (соблюдение условия  $l \geq 10^{14} \text{см}^{-3} \text{с}$ ).

Изучение самосжимающихся разрядов явилось своеобразной школой плазменных исследований, позволяющих получать плотную плазму со временем жизни, хотя и малым ( $\sim 10^{-8}$  с), но достаточным для изучения физики П.-э., разработать разнообразные методы диагностики

плазмы, развить совр. теорию процессов в ней. Эволюция установок с пинчем привела к созданию мн. типов плазменных устройств, в к-рых неустойчивости П.-э. либо стабилизируются с помощью внеш. магн. полей (квазиэстабильные системы типа *токамака*), либо сами эти неустойчивости используются для получения короткоживущей сверхплотной плазмы в т. н. быстрых процессах (*плазменный фокус*, микронички), либо весь процесс имеет столь малую длительность ( $\sim 10^{-7}$  с), что неустойчивость пинча не успеет развиться.

В связи с успехами техники получения больших импульсных токов по-новому встал вопрос о П.-э. в металлич. проводниках в виде полых тонностенных цилиндров. Пропускание большого тока через полый цилиндр приводит к его разрушению — сжатию, смятию, сплюсыванию, потере первонач. формы. Такой эффект наблюдается, напр., при попадании молнии в трубчатый громоотвод. Сжатие металлич. цилиндра в варианте z-пинча или  $\theta$ -пинча стало широко использоваться в работах по получению импульсных магн. полей, сверхвысоких давлений, в процессах магн. сварки металлов и т. д.

Новая интересная идея использовать z-П.-э. связана с радиац. охлаждением плазмы сильноизлучающих газов. Потери плазмой энергии на излучение уменьшают противодействие магн. сжатию, и микронички позволяют надеяться на получение сверхвысокой плотности вещества при т. явлении радиац. коллапса.

П.-э. имеет место также и в плазме твёрдых тел, особенно в сильно вырожденной электронно-дырочной плазме полупроводников, где этот эффект влияет на их проводящие свойства.

Лит.: Арцимович Л. А., *Элементарная физика плазмы*, 3 изд., М., 1969; Стилл М., Вюраль В., *Взаимодействие волн в плазме твёрдого тела*, пер. с англ., М., 1973; Эйнкьяков С. Ю., *Горячая плазма и управляемый ядерный синтез*, М., 1975.

**ПИОННЫЕ АТОМЫ** — см. *Адронные атомы*.

**ПИОНЫ** — то же, что *пи-мезоны*.

**ПИПНАРДА УРАВНЕНИЕ** — связывает плотность тока в сверхпроводнике с магн. полем. Установлено А. Б. Пипнардом (А. В. Pippard) в 1953. Согласно Т. у., эта связь нелокальна, т. е. плотность тока  $j(r)$  определяется значением вектора-потенциала  $A(r)$  во всякой той же точке, а в целой области:

$$j(r) = \frac{c}{4\pi} \int K(r',r) A(r' - r) dr', \quad (1)$$

причём  $K(r')$  различно от нуля в области с размерами порядка т. н. длины когерентности  $\xi_0 = \hbar v_F / \Delta$  ( $v_F$  — скорость электронов на поверхности Ферми,  $\Delta$  — сверхпроводящая щель). Для компонента Фурье плотности тока и вектор-потенциала (соотв.  $j_q$  и  $A_q$ ) ур-ние (1) принимает вид

$$j_q = (c/4\pi) K(q) A_q,$$

где  $q$  — волновой вектор. При  $q \ll 1/\xi_0$  ядро  $K(q)$  стремится к постоянной. В этом случае Т. у. сводится к *Лондонскому уравнению* (лондонский предельный случай). Когда  $q \gg 1/\xi_0$  (шипнардовский предельный случай),

$$K(q) = \frac{4\pi N_s e^2}{mc^2} \cdot \frac{3\pi^2 \Delta}{4q v_F} \quad (2)$$

( $N_s$  — плотность сверхпроводящих электронов,  $e$ ,  $m$  — заряд и масса электрона). Поскольку в сверхпроводнике наб. существенны  $q \sim 1/\delta$ , где  $\delta$  — глубина проникновения магн. поля в сверхпроводник,  $\phi$ -ла (2) применима для металлов, в к-рых  $\delta \ll \xi_0$  (сверхпроводники шипнардовского типа, напр. Al).

Если сверхпроводник загрязнён примесями, так что длина свободного пробега электронов  $l \ll \xi_0$  (сверхпроводящий сплав), то связь  $j$  с  $A$  выражается тем же Т. у. (1), однако теперь ядро  $K(r)$  различно от нуля лишь в области с размером порядка  $l$ .

Лит. см. при ст. *Сверхпроводимость*. Л. П. Пшмаевский,

**ПИРОМЕТРИЯ ОПТИЧЕСКАЯ** (от греч. *πύρ* — огонь и *metrōō* — измеряю) — совокупность оптических (бесконтактных) методов измерения темп-ры. Почти все оптич. методы основаны на измерении интенсивности теплового излучения (иногда — поглощения) тел. Интенсивность теплового излучения резко убывает с уменьшением темп-ры  $T$  тел, поэтому методы П. о. применяют для измерения относительно высоких темп-р. При  $T \leq 1000^\circ\text{C}$  они играют второстепенную роль, но при  $T > 1000^\circ\text{C}$  становятся основными, а при  $T > > 3000^\circ\text{C}$  — практически единств. методами измерения  $T$ . Это связано с тем, что методы П. о. не требуют контакта датчика измерит. прибора с телом, темп-ра к-рого измеряется. Методами П. о. в промышленности и лаб. условиях определяют темп-ру в печах и др. нагреват. установках, темп-ру расплав. металлов и изделий из них (проката и т. п.), темп-ру плазм, нагретых газов, плазмы. Осн. условие применимости методов П. о. — излучение тела должно быть тепловым, т. е. подчиняться *Кирхгофа закону излучения*. Твёрдые тела и жидкости при высоких темп-рах обычно удовлетворяют этому требованию, в случае же газов и плазм необходимо спец. проверка его выполнения. Так, излучение однородного слоя плазмы подчиняется закону Кирхгофа, если распределение молекул, атомов, ионов и электронов плазмы по скоростям соответствует *Максвелла распределению*, населённости возбуждённых уровней — *распределению Больцмана* (см. *Больцмана статистика*), а диссоциация молекул и ионизация атомов определяются законом действующих масс, причём во все эти соотношения входит одно и то же значение  $T$ . Такое состояние плазмы наз. термически равновесным. Интенсивность излучения однородной равновесной плазмы однозначно определяется её хим. составом, давлением, атомными константами и равновесной темп-рой. Если плазма неоднородна, то даже в условиях термич. равновесия её непосредственно наблюдаемое излучение не подчиняется закону Кирхгофа. В этом случае необходимо спец. приёмами определить локальные интенсивности излучения. Методы П. о. плазмы многообразны и сложны, они являются составной частью *диагностики плазм*. Напротив, для твёрдых тел и жидкостей, спектр излучения к-рых чаще всего сплошной, методы П. о. довольно просты. В этом случае измерение темп-ры осуществляют пирометрами, действие к-рых основано на применении законов излучения *абсолютно чёрного тела*. Обычно в исследуемом теле вытачивают полость с небольшим выходным отверстием. Полость по отношению к попадающему в неё излучению обладает коэф. поглощения, близким к единице (т. е. по оптич. свойствам она близка к абсолютно чёрному телу).

Наиб. универсальны методы П. о. осн. на измерении интенсивности спектральных линий. Они обеспечивают макс. точность, если известны вероятность соответствующего квантового перехода и концентрации атомов данного сорта. Если же концентрация атомов не известна с достаточной точностью, то применяют метод отнosit. интенсивности, в к-ром темп-ры вычисляют по отношению интенсивностей двух или неск. спектральных линий.

В др. группе методов П. о. темп-ра определяется по форме или ширине спектральных линий, к-рые зависят от темп-ры либо непосредственно (доплеровское уширение спектральных линий), либо косвенно (в соответствии со *Штарка эффектом* и зависимость плотности плазмы от темп-ры). В нек-рых методах  $T$  определяют по абс. или отнosit. интенсивности сплошного спектра (континуума). Особое значение имеют методы измерения  $T$  по спектру рассеянного плазмой излучения лазера, позволяющие исследовать неоднородную плазму. К недостаткам П. следует отнести трудоёмкость измерений, сложность интерпретации результатов, невысокую точность (например, погрешности измерений температуры плазмы в лучшем случае составляют 3—10%).

Лит.: Рибо Г., *Оптическая пирометрия*, пер. с франц., М. — Д., 1934; *Оптическая пирометрия плазмы*, пер. с англ., М., 1960; Гурлов А. Н., *Основы пирометрии*, 2 изд., М., 1971. **ПИРОМЕТРЫ** — приборы для измерения темп-ры тел по интенсивности их теплового излучения в оптич. диапазоне длин волн. Тело, темп-ру к-рого определяют по  $T$ , должно находиться в состоянии термодинамич. равновесия и обладать коэф. поглощения, близким к единице (см. *Пирометрия оптическая*). Применяют яркостные, цветные и радиац. П. Яркостные в т. ч. е П. обеспечивают наиб. точность измерений темп-ры в диапазоне  $10^3$ — $10^4$  К. В простейшем в визуальном яркостном П. с исчезающей нитью объектив фокусирует изображение исследуемого тела на плоскость, в к-рой расположена нить (ленточка) спец. лампы накаливания. Через окуляр и красный фильтр, позволяющий выделять узкую спектральную область вблизи длины волн  $\lambda_0 = 0,65$  мкм, нить рассматривают на фоне изображения тела и, изменяя ток в нити накала лампы, добиваются, чтобы яркости нити и тела стали одинаковыми (нить становится неразличимой на фоне тела). Шкалу прибора, регистрирующего ток, градуируют обычно в  $^\circ\text{C}$  или К, и в момент выравнивания яркостей нити и тела прибор фиксирует т. ч. яркостную темп-ру ( $T_y$ ) тела. Истинная темп-ра тела  $T$  определяется на основе законов теплового излучения (Кирхгофа и Планка) по ф-ле

$$T = T_y \epsilon_2 / (\epsilon_2 + \lambda_0 T_y \ln \alpha_{\lambda, T}),$$

где  $\epsilon_2 = 0,01488$  м·К (т. ч. вторая постоянная излучения),  $\alpha_{\lambda, T}$  — коэф. поглощения тела,  $\lambda_0$  — эфф. длина волны П.

Точность результата в первую очередь зависит от строгости выполнения условий пирометрич. измерений (близость к единице коэф. поглощения  $\alpha_{\lambda, T}$  и др.). Для выполнения этих условий обычно наблюдают излучение, выходящее из полости с небольшим отверстием, представляющим собой модель абсолютно чёрного тела. Осн. инструментальная погрешность обусловлена нестабильностью температурной лампы. Заметную погрешность могут внести индивидуальные особенности глаза наблюдателя.

У фотозлектрич. яркостных П. этот вид погрешности отсутствует. Погрешность образцовых лабораторных фотозлектрич. П. не превышает сотых долей К при  $T \sim 1000$  К. Образцовые яркостные П. приняты в качестве осн. интерполяц. приборов, определяющих Международную практич. температурную шкалу (МПТШ-68) при темп-рах выше точки затвердевания золота ( $1063,43^\circ\text{C}$ ).

Для измерения темп-ры тел, у к-рых коэф.  $\alpha$  постоянен в оптич. диапазоне спектра, применяют цветные П. Этими П. измеряют отношение яркостей  $b_1(\lambda_1, T)/b_2(\lambda_2, T)$  обычно в синей и красной областях спектра (напр. для длин волн  $\lambda_1 = 0,48$  мкм и  $\lambda_2 = 0,60$  мкм). Шкала прибора градуируется в  $^\circ\text{C}$  и показывает цветную темп-ру  $T_c$ . Истинная темп-ра тела определяется по ф-ле

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_c} + \frac{\ln \alpha_{\lambda_1, T} - \ln \alpha_{\lambda_2, T}}{\epsilon_2 (\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1})}.$$

Точность цветových П. ниже, чем яркостных.

Наиб. чувствительны (по наименее точной радиационной П. (П. суммарного излучения), регистрирующее полное излучение тела. Действие их основано на *Стефана — Больцмана законе излучения* и на *Кирхгофа законе излучения*. Объектив радиац. П. фокусирует наблюдаемое излучение на приёмник (обычно термостойкий или болометр), сигнал к-рого регистрируется прибором, калиброванным по излучению абсолютно чёрного тела или показывающим радиац. темп-ру  $T_r$ . Истинная темп-ра тела определяется по ф-ле

$$T = \alpha^{1/4} T_r,$$

где  $\alpha_T$  — полный коэф. поглощения тела. Раднак, П. измеряет темп-ру начиная с 200 °С. В промышленности этот тип П. широко применяют в системах контроля и управления температурными режимами, разл. технол. процессов.

**Лит. см. при ст. Пирозетриция оптическая.**  
**ПИРОЭЛЕКТРИКИ** — кристаллич. *дielekтрики*, на поверхности к-рых при изменении темп-ры  $T$  возникают электрич. заряды. Появление электрич. зарядов связано с изменением спонтанной поляризации.

**Историческая справка.** В нач. 18 в. в Европу были завезены кристаллы турмалина («ешилонский магнит»), обладающие свойством при нагревании оказывать силовое воздействие на частицы пепла. Ф. У. Т. Эпинус (F. U. Th. Aepinus, 1756) установил причину — образование на концах нагретого кристалла зарядов противоположного знака. Термин «пирозетричество» был введен Д. Брюстером (D. Brewster, 1824). Кельвин (W. Thomson, Lord Kelvin) выявил пирозетрич. эффект с изменением электрич. поляризации при изменении  $T$ . Аккерман (W. Ackermann, 1945) исследовал пирозетрич. эффект в ряде кристаллов в пирозетрич. интервале  $T$  и обнаружил тенденцию к убыванию пирозетрич. эффекта при повышении  $T$ . Первая микроскопич. теория создана С. А. Богуславским (1915). В дальнейшем было установлено, что у сегнетоэлектриков величина эффекта весьма велика вблизи точки фазового перехода.

Спонтанная поляризация  $P_0$  может существовать только при достаточно низкой симметрии кристалла. Иметь зависящую от  $T$  спонтанную поляризацию, т. е. быть П., могут лишь кристаллы, в к-рых есть полярное направление, не изменяющееся при всех преобразованиях симметрии (полярные диэлектрики и к-ры) вдоль этого направления располагается вектор  $P_0$ . Таким полярным направлением обладают кристаллы 10 точек из групп симметрии: 1, 2, 3, 4, 6,  $m$ ,  $mm2$ ,  $3m$ ,  $4m$ ,  $6m$  (рис. 1). В группах 1 и  $m$  беско-

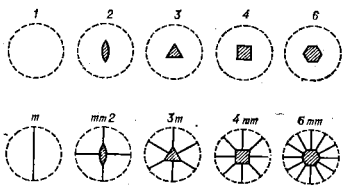


Рис. 1. Возможные точечные группы симметрии пирозетриков, показаны оси симметрии кристаллов.

нечно много таких направлений и направление  $P_0$  не предопределено. В остальных группах это оси симметрии.

Спонтанная поляризация проявляется в виде связанного заряда в тех местах кристалла, где  $P_0$  зависит от координат:

$$-\rho_{св} = \text{div} P_0,$$

$\rho_{св}$  — объёмная плотность связанного заряда. Т. о., на поверхности П. возникает связанный поверхностный заряд, плотность к-рого равна нормальной компоненте  $P_0$ . При этом внутри кристалла и вне его возникает электрич. поле  $E_0$ . В бесконечной пластине, вырезанной перпендикулярно  $P_0$ ,

$$E_0 = -4\pi P_0.$$

В общем случае поле  $E_0$  и полная энергия П. зависят от его формы.

В реальном П. поле  $E_0$  внутри и вне его равно 0 (хотя  $P_0$  сохраняется). Причина — электропроводность — свободные заряды, перемещающиеся к поверхности, ней-

трализуют связанный заряд. Поэтому пирозетрич. свойства можно наблюдать только при достаточно быстром изменении темп-ры кристалла.

**Свойства П.** Упр-ние, связывающее изменение  $P_0$  и  $T$ , имеет вид:

$$\Delta P_0 i = \gamma_i \Delta T,$$

где  $\gamma_i$  — пирозетрич. коэф., к-рые можно рассматривать как компоненты вектора  $\gamma(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ . В П. всех классов симметрии, кроме 1 и  $m$ , вектор  $\gamma$  направлен вдоль оси симметрии, к-рая является одной из координатных осей ( $z$ ), т. е.  $\gamma = (\gamma, 0, \gamma_3)$ . В группе 1 вектор  $\gamma$  лежит в плоскости симметрии:  $\gamma(\gamma_1, \gamma_2, 0)$ . В группе 1 направление  $\gamma$  произвольно относительно координатных осей:  $\gamma(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ .

Пирозетрич. коэф.  $\gamma$  зависит от механч. условий: образец может быть «свободен» (механч. напряжение отсутствует) либо «связан», когда внешние механч. напряжения  $\sigma_{ij}$  обеспечивают отсутствие механч. деформаций  $u_{ij}$ , возникающих за счёт теплового расширения при изменении  $T$ . При одноврем. изменении  $T$ ,  $E$  термодинамич. потенциал  $\Phi$  кристалла (при пост. механч. напряжении) изменяется на величину

$$d\Phi = -SdT - P_i dE_i,$$

где  $S$  — энтропия кристалла. Т. к.  $P_i = -(\partial\Phi/\partial E)_T$ ,  $S = -(\partial\Phi/\partial T)_{E_i}$ ,  $\partial^2\Phi/\partial T\partial E_i = \partial^2\Phi/\partial E_i\partial T$ , то

$$\gamma_i = \frac{\partial P_i}{\partial T} = \frac{\partial S}{\partial E_i}.$$

Т. о., пирозетрич. коэф. определяет и изменение энтропии кристалла под действием электрич. поля:

$$\Delta S = \gamma_i E_i.$$

Это означает, что темп-ра П., находящегося в состоянии адабатики, изоляции, при выхождении электрич. поля вдоль полярной оси изменится на величину

$$\Delta T = \frac{T\alpha C}{\gamma} = \frac{T\gamma_C}{\gamma} E,$$

где  $C$  — теплоёмкость кристалла при постоянных механч. напряжениях и электрич. поле (электростатический эффект). Изменение  $T$  для линейных П. с  $\gamma = 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>·К и  $C = 10^3$  Дж/кг·К в полях  $E \sim 10^8$  В/м имеет порядок  $10^{-4}$  К, в сегнетоэлектриках  $1-10^{-2}$  К.

Все П. являются *пьезоэлектриками*, поэтому изменение темп-ры «свободного» кристалла, приводящее к его тепловому расширению или сжатию (деформации), вызовет добавочную электрич. поляризацию:

$$\Delta P_{0i} = \epsilon_{ijk} \alpha_{jk} \Delta T = \gamma^i \Delta T.$$

Здесь  $\epsilon_{ijk}$  — тензор 3-го ранга пьезоэлектрич. модулей,  $\alpha_{jk}$  — компоненты тензора коэф. теплового расширения, а суммарная поляризация

$$\Delta P_{0i} = \Delta P_{0i}^I + \Delta P_{0i}^{II} = (\gamma_i^I + \gamma_i^{II}) \Delta T.$$

Здесь  $\gamma_i^I$  — коэф. «первичного»,  $\gamma_i^{II}$  — «вторичного» пирозетрич. эффекта. Для разл. кристаллов соотношения между  $\gamma_i^I$  и  $\gamma_i^{II}$  варьируются в широких пределах: вторичный эффект может превышать первичный, иметь др. знак и т. д. «Третичный» пирозетрич. эффект связан со изменением  $P$  в неоднородно нагретом пьезоэлектрике.

Микроскопическая теория П., позволяющая выяснить природу пирозетрич. эффекта и описать свойства П., основана на рассмотрении ангармонизма колебаний кристаллической решетки. Температурная зависимость пирозетрич. коэф. в области низких темп-р удовлетворительно описывается соотношением

$$\gamma = \gamma_0^D \left( \frac{\theta_p}{T} \right) + \sum_{i=1}^{\infty} \gamma_i^0 \left( \frac{\theta_p}{T} \right)^i.$$

Здесь  $\theta_D$ ,  $\theta_E$  — характеристич. темп-ры Дебая и Эйнштейна,  $D$  и  $\Sigma$  — ф-ции Дебая и Эйнштейна,  $\gamma_D$ ,  $\gamma_E$  — постоянные коэф. (см. Дебая температура, Эйнштейна температура).

Экспериментальные методы. Для измерения у необходимо определить величину заряда, возникающего на поверхности кристалла определенной ориентации и формы при изменении  $T$ . Для этого обычно используют плоскостепенные пластины, вырезанные перпендикулярно полярной оси кристалла. Большие поверхности образца покрываются проводящими электродами. Изменение ср. темп-ры кристалла на величину  $\Delta T$  приводит к увеличению на электродах связанного заряда  $\Delta Q_{\text{связ}} = \gamma \Delta T (S - \text{площадь электродов})$  и разности потенциалов  $V = \Delta Q/C$  ( $C$  — ёмкость образца).

Для измерения заряда конденсатор  $K$  с образцом помещается в термостат (рис. 2), темп-ра к-рого может изменяться. При появлении пироэлектрич. заряда потенциала точки  $A$  изменяется, заряд может быть измерен

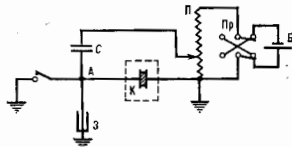


Рис. 2. Статический метод определения пироэлектрического коэффициента.

электронетром  $\Sigma$ . Обычно электронетром используют в качестве нуль-индикатора и определяется заряд противоположного знака, по величине равный пироэлектрическому (компенсация, схема, состоящая из батареи Б, потенциометра П и ёмкости С, переключателя Пр, служит для изменения знака заряда конденсатора). Заряд на конденсаторе  $Q$  подбирается так, чтобы потенциал точки  $A$  был равен 0. В этом случае  $Q = \Delta Q_{\text{связ}}$ .

В др. методе измеряется пироэлектрич. ток  $I$ , протекающий между обкладками конденсатора по внеш. цепи при непрерывном изменении  $T$  образца (рис. 3). При заданной скорости изменения темп-

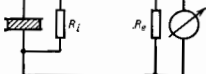


Рис. 3. Измерение пироэлектрического коэффициента в «токовом» режиме.

рды  $dT/dt$  величина  $\gamma$  определяется при  $R_1 \gg R_2$ :

$$\gamma = (I/S)(dT/dt)^{-1}.$$

Пироэлектрические материалы и их практическое применение. Типичными П. являются турмалины,  $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Среди П. особое место занимают сегнетоэлектрики, в к-рых температурная область полярной фазы ограничена: при повышении  $T$  спонтанная поляризация уменьшается и исчезает в точке фазового перехода  $T_K$ . Вблизи  $T_K$

$$\gamma \sim (T_K - T)^{-1/2}$$

и может достигать бесконечно больших значений. Для практич. целей важны П., в к-рых у сохраняют высокие значения в достаточно широком интервале  $T$ . Ряд сегнетоэлектриков удовлетворяет этому условию; оск. препятствие их применения — допозарядная из-за рабония кристаллов на домены. Используются разл. способы сохранения в кристаллах м о н о д о м е н н о г о с о с т о я н и я: введение в растущий кристалл примесей, у-облучение в электр. поле; для кристаллов с высокими  $T_K$  — охлаждение при переходе через  $T_K$  в электр. поле. При введении примесей и облучении в сегнетоэлектриках возникают внутр. поля, достигаю-

щие  $10^6$  В/м. Помимо стабилизации монокристаллического состояния эти поля приводят к «размытию» фазового перехода, причём область  $T$ , где у имеет аномально высокие значения, расширяется. Пироэлектрич. свойствами обладают керамика, сегнетоэлектрики, поликристаллические электр. поля, а также нек-рые полимеры (табл.).

Пироэлектрические свойства некоторых материалов при  $T=300$  К

	$\gamma \cdot 10^{-12}$ Кл·см <sup>-2</sup> ·К <sup>-1</sup>								
Турмалин $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0,04 0,8								
Сегнетоэлектрич. монокристаллы	<table border="0"> <tr> <td>тригалцисульфат с примесью L-<math>\alpha</math>-аланина</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td><math>\text{LiTaO}_3</math></td> <td>2,1</td> </tr> <tr> <td><math>\text{LiNbO}_3</math></td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td><math>\text{Pb}_2\text{GeO}_5</math></td> <td>0,5</td> </tr> </table>	тригалцисульфат с примесью L- $\alpha$ -аланина	2,5	$\text{LiTaO}_3$	2,1	$\text{LiNbO}_3$	0,4	$\text{Pb}_2\text{GeO}_5$	0,5
тригалцисульфат с примесью L- $\alpha$ -аланина	2,5								
$\text{LiTaO}_3$	2,1								
$\text{LiNbO}_3$	0,4								
$\text{Pb}_2\text{GeO}_5$	0,5								
Керамич. сегнетоэлектрики	<table border="0"> <tr> <td>титанат-цирконат Pb титанат-цирконат Pb с примесью La</td> <td>0,6÷5,0</td> </tr> <tr> <td><math>\text{BaTiO}_3</math></td> <td>3,5-17 2,3</td> </tr> </table>	титанат-цирконат Pb титанат-цирконат Pb с примесью La	0,6÷5,0	$\text{BaTiO}_3$	3,5-17 2,3				
титанат-цирконат Pb титанат-цирконат Pb с примесью La	0,6÷5,0								
$\text{BaTiO}_3$	3,5-17 2,3								
Полимеры	<table border="0"> <tr> <td>поливинилфторид PVF</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>поливинилпирролидон PAN</td> <td>0,01</td> </tr> </table>	поливинилфторид PVF	0,3	поливинилпирролидон PAN	0,01				
поливинилфторид PVF	0,3								
поливинилпирролидон PAN	0,01								

П. используются как термоэлектрич. преобразователи. Основой является пироэлектрич. пластина с металлич. электродами, нанесёнными на срез, перпендикулярный полярной оси. На входе — поток лучистой энергии, изменяющий темп-ру П., на выходе — электр. заряд или напряжение. Преимущества пироэлектрич. преобразователей — широкий диапазон частот детектируемых излучений, высокая чувствительность, быстротысание, способность к работе при  $T \sim 300$  К. Пироэлектрич. приёмники применяются как детекторы

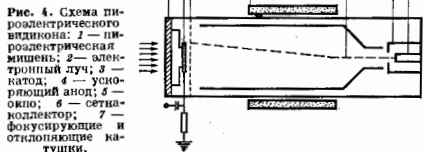


Рис. 4. Схема пироэлектрического детектора ИК-излучения: 1 — пироэлектрическая мишень; 2 — электронный луч; 3 — катод; 4 — ускоряющий анод; 5 — окно; 6 — сетчатый коллектор; 7 — фокусирующая и отклоняющая катушки.

ИК-излучения малой мощности; детекторы формы и мощности коротких ( $10^{-3}$ — $10^{-11}$  с) импульсов излучения; чувств. датчики в спектро- и радиометрии; пирометрии. Особенно перспективно их применение для индикации пространственного распределения излучений, в т. ч. в системах визуализации ИК-изображений. Созданы пироэлектрич. видеоканалы — тепловые передающие телевизионные трубки с пироэлектрич. мишенью (рис. 4). С внеш. стороны через окно 5 на мишень 1 в виде тонкой ( $10$ — $100$  мкм) пироэлектрич. пластины (диам.  $18$ ÷ $20$  мм) процируется изображение объекта; внутр. сторона обрабена и считываемому электронному лучу 2. Изображение объекта создаёт на мишени температурный и соответствующий ему зарядовый и потенциальный рельеф. Этот рельеф модулирует ток, протекающий в цепи нагрузочного сопротивления при сканировании мишени электронным лучом. Создаваемое током напряжение управляет яркостью луча, воспроизводящего изображение на телевизионном мониторе.

Лит.: Ная Дж., Физические свойства кристаллов, пер. с англ., 2 изд., М., 1967; Желудев И. С., Физика кристаллических диэлектриков, М., 1968; Н о в и к В. К., Г л а з и л о в а Н. И., Ф е д ь я н и н Н. В., Пироэлектрические преобразователи, М., 1978; К р е м е н ц у с к и й Л. С., Р о й д и н а О. В., Пироэлектрические приемные устройства, К., 1982. Б. А. Стрыков.

**ПЛАВЛЕНИЕ ТЕЛ** — состояние равновесия твёрдого тела, частично или полностью погружённого в жидкость (или газ). Осн. задача теории П. т. — определение равновесия тела, погружённого в жидкость, выяснение условий устойчивости равновесия. Простейшие условия П. т. указывает *Архимедов закон*.

Оси. понятия теории П. т. (рис. 1): 1) водоизмещение тела — вес жидкости, вытесняемой телом в состоянии

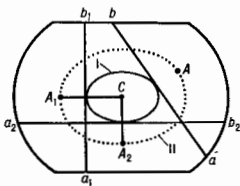


Рис. 1.  $ab, a_1b_1, a_2b_2$  — плоскости возможной грузовой ватерлинии;  $A, A_1, A_2$  — центры водоизмещения для объёмов, отсечаемых плоскостями  $ab, a_1b_1, a_2b_2$ ;  $I$  — поверхность грузовой ватерлинии;  $II$  — ось вращения;  $C$  — центр водоизмещения.

равновесия (совпадает с весом тела); 2) плоскость возможной грузовой ватерлинии — всякая плоскость  $ab$ , отсекающая от тела объём, вес жидкости в к-ром равен водоизмещению тела; 3) поверхность грузовой ватерлинии — поверхность  $I$ , в каждой точке к-рой касательная плоскость является плоскостью возможной грузовой ватерлинии; 4) центр водоизмещения (или центр тяжести) — центр тяжести  $A$  объёма, отсекаемого плоскостью возможной грузовой ватерлинии; 5) поверхность центров водоизмещения — поверхность  $II$ , являющаяся геом. местом центров водоизмещения.

Если тело погрузить в жидкость до к-в. плоскости возможной грузовой ватерлинии  $ab$  (рис. 2), то на тело будут действовать направленные перпендикулярно этой плоскости (т. е. вертикально вверх) выталкивающая сила  $F$ , проходящая через центр  $A$ , и численно равная ей сила тяжести  $P$ . Как доказывается в теории П. т., направление силы  $F$  совпадает одновременно с направлением нормали  $A_1k$  к поверхности  $II$  в точке  $A$ .

В положении равновесия силы  $F$  и  $P$  должны быть направлены вдоль одной прямой, т. е. нормаль к поверхности  $II$ , восстановленная из центра  $A$ , должна проходить через центр тяжести  $C$  тела (нормали  $A_1C, A_2C$  на рис. 1). Число нормалей к поверхности  $II$ , проходящих через центр тяжести  $C$ , даёт число возможных положений равновесия плавающего тела. Если тело вывести из положения равновесия, то на него будет действовать пара сил  $F, P$ . Когда эта пара стремится вернуть тело в положение равновесия, равновесие устойчиво, в противном случае — неустойчиво. Об устойчивости равновесия можно судить по положению *метacentра*. Другой простой признак: положение равновесия устойчиво, если для него расстояние между центрами  $A$  и  $C$  является наименьшим по сравнению с этим расстоянием для соседних положений (на рис. 1 при погружении до плоскости  $a_1b_1$  равновесие устойчиво, а до  $a_2b_2$  — неустойчиво).

Лит.: Жуковский Н. Е., Теоретическая механика, 2 изд., М — Л, 1952.

**ПЛАВУЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ** — потенциал тела, помещённого в плазму (звзд, диалектрич. стенка, антеннур), когда суммарный ток на него равен нулю (ионный ток равен электронному). П. п. возникает, если на элект-

род идёт амбиполярный ток. Т. к. скорость электронов из-за малой массы больше скорости ионов, то электроны заряжают тело отрицательно по отношению к плазме. В дальнейшем потенциал достигает такой величины, когда скорость сбора положительных ионов на к.-л. теле в точности совпадает со скоростью сбора диффузировавшихся на него электронов. П. п. определяется из равенства электронного и ионного токов и имеет величину порядка

$$\sim (kT_e/2e) \ln(T_e M_i / T_i m_e),$$

где  $T_e, T_i$  — темп-ры электронов и ионов,  $e$  — заряд,  $m_e$  и  $M_i$  — масса электронов и ионов. П. п., обусловленный различием в скорости диффузии заряд. частиц, может возникать не только на теле, помещённом в плазму, но и в электролитах.

Лит.: Деб Л. I, Основные процессы электрических разрядов в газах, пер. с англ., М. — Л., 1956. В. Г. Курье.

**ПЛАВЛЕНИЕ** — переход вещества из кристаллич. твёрдого состояния в жидкое. П. происходит за поглощением тепла как *фазовой переход* 1-го рода, оно состоит в позиционном разупорядочении системы: регулярное пространственное расположение атомов (молекулу) сменяется нерегулярным при вынажит. изменении ср. расстояний между ними. Температур.  $T_{пл}$  зависит от давления  $P$ . Для двух- и многоатомных молекул при П. наблюдаются также ориентационное разупорядочение, у нек-рых веществ оно предшествует П.

Линия фазового равновесия кристалл — жидкость, отвечающая равенству химических потенциалов фаз  $\mu_{крист}(T, P) = \mu_{жидк}(T, P)$ , начинается в *тройной точке*  $A$  чистого вещества (рис. 1) и прослеживается до давлений  $\sim 10^6$  Па. Если в системе происходит полиморфное превращение (см. *Полиморфизм*), то линия П. имеет излом в тройной точке кристалл I — кристалл II — жидкость. У ряда веществ с изменением темп-ры и давления наблюдается более двух полиморфных превращений.



Рис. 1. Линия плавления  $AB$  на диаграмме состояния чистого вещества:  $A$  — тройная точка равновесия кристалл — жидкость — газ,  $K$  — критическая точка,  $AD$  — эвтропная линия плавления за тройную точку.

Для большинства веществ темп-ра П. увеличивается с ростом давления,  $dT_{пл}/dP > 0$ . Но для воды,  $Ga, Bi, Sb$ , нек-рых сплавов  $dT_{пл}/dP < 0$  в окрестности тройной точки  $A$ . При плавлении энтропия  $S$  возрастает,  $\Delta S = S_{ж} - S_{крист} > 0$ , т. е. теплота плавления  $L = T \Delta S$  положительна. (Известно исключение, относящееся к  $^3He$  при  $T < 0,32$  К. Оно связано с явлением преэмбрионного ориент. упорядочения ядерных спинов в жидкой фазе.) Тогда, согласно *Клапейрона — Клаузиуса уравнению*,  $dP/dT = \Delta S/\Delta v$ , знак  $dP/dT$  совпадает со знаком скачка объёма  $\Delta v = v_{ж} - v_{крист}$ . Для нормальных плавающих веществ объём при П. увеличивается,  $\Delta v > 0$ . В табл. даны значения  $T_{пл}$  при

Вещество	$T_{пл}, K$	$\Delta S/R$	$\Delta v/v_{крист}$	Вещество	$T_{пл}, K$	$\Delta S/R$	$\Delta v/v_{крист}$
Ag	83,8	1,69	0,142	Cu	1358	4,15	0,046
Xe	161,3	1,71	0,151	Zn	1338	1,15	0,055
Na	63,2	1,37	0,072	Al	892,7	1,25	0,041
Ca	34,4	0,99	0,075	Al	833	1,30	0,064
CH <sub>4</sub>	90,7	1,24	0,081	Pb	600,2	1,00	0,037
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	278,6	4,25	0,133	Fe	1811	1,01	0,039
CaF <sub>2</sub>	185,0	4,86	0,084	Ni	1728	1,23	0,063
NaCl	370,8	0,86	0,026	NaCl	1073	3,37	0,259
K	335,7	0,86	0,025	KCl	1043	3,12	0,173

атм. давления, при определённых значениях скачков энтропии  $\Delta S/R$  ( $R$  — газовая постоянная) и объёма  $\Delta V/\mu_{крст}$  для нек-рых веществ.

Из табл. видно, что для простых веществ  $\Delta S/R$  лежит в интервале 0,86—1,71 ( $\Delta S \approx 7,2$ —14,2 Дж/моль·К). Более высокие значения  $\Delta S$  характерны для веществ, у к-рых при П. возбуждаются дополнительные (напр., ориентационные) степени свободы ( $C_6H_6$ ,  $C_6F_{14}$  и др.) или перестраивается электронная структура (Si, Ge, Bi и др.). Увеличение объёма у металлов значительно меньше, чем у инертных газов и воиных солей. Зависимость  $T_{пл}$  элементов от их ат. номера  $Z$  монотонна и обнаруживает периодичность (рис. 2). Похожий вид имеет зависимость от  $Z$  теплоты плавления  $L$ .

Термодинамика движущей силой П. является отклонение двухфазной системы от равновесия. Мерой этого отклонения служит разность химических потенциалов  $\mu_{жст}(T, P) - \mu_{крст}(T, P) > 0$ . Стационарное состояние обеспечивается подводом тепла к границе раздела фаз при постоянном внеш. давлении. П. — результат конкуренции двух фаз, каждая из к-рых устойчива по отношению к малым возмущениям.

П. сопровождается скачкообразным изменением  $S$ ,  $v$  и внутр. энергии при медленном изобарич. нагревании образца. При П. не только теряется регулярность структуры (дальний порядок в расположении атомов), но существенно изменяется в среднем и координация соседних атомов (ближний порядок).

Зависимость между  $T$  и  $P$  на линии П. приближённо передается эмпирич. ур-нием  $(P/P_0) + 1 = (T/T_0)^c$ . Здесь  $c > 1$  — индивидуальная постоянная, к-рую следует рассматривать как параметр термодинамики, подобная веществ относительно П., значения  $T_0$  и  $P_0$  ( $T_0$  — темп-ра плавления при  $P=0$ ,  $P_0 = -P$  при  $T=0$ ) получены экстраполяцией линии П. за тройную точку (линия  $A$  на рис. 1). Для нормальнo плавящихся веществ  $P_0 > 0$ .

Физически продолжение линии фазового равновесия за тройную точку возможно. Обе отсутствующие фазы при этом находятся в равновесии и удовлетворяют условию  $\mu_{жст} = \mu_{крст}$ . Эмпирич. ур-ние приводит к асимптотике  $dP/dT \rightarrow 0$  при  $T \rightarrow 0$ , к-рая согласуется с теорией Нерста. Поиск высокотемпературной асимптотики линий П. не привёл к универсальному результату. В отличие от равновесия жидкость — пар критическая точка на линии равновесия кристалл — жидкость не обнаружена. Её появление считается невозможным, что объясняется различием симметрии кристалла и жидкости.

При П. имеет место размерный эффект: темп-ра П.  $T_R$  малых частиц ( $R$  — эфф. радиус частицы) ниже, чем  $T_{пл}$  больших кристаллов. Эффект связан с поверхностью энергии, к-рая относительно невелика для малых частиц. Напр., для Sn  $T_{пл} = 505$  К,  $T_R \approx 480$ ; 460; 415 К соответственно для  $R = 10$ ; 6; 4 нм.

П. частично аморфных веществ, напр. полимеров, происходит в нек-ром интервале темп-р. Для двух- и многокомпонентных систем равновесные составы кристаллич. и жидкой фаз различны, темп-ра П. двойного сплава зависит от его состава (концентрация  $x$ ). Вид простой диаграммы состояний показан на рис. 3. Смесью образует непрерывный ряд растворов в жидком и кристаллич. состояниях. Равновесные составы жидкой ( $x_{жст}$ ) и кристаллич. ( $x_{крст}$ ) фаз при заданной темп-ре  $T$  определяются, как показано на рис. 3.

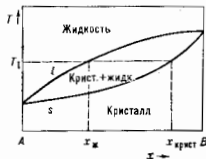


Рис. 3. Диаграмма состояния кристалл — жидкость двухкомпонентной системы,  $x$  — атомная (молекулярная) доля компонента В в растворе.

Относит. количества фаз зависят от исходной концентрации однородной системы и определяются из условия сохранения масс компонент. Верхняя линия  $I$  — кривая ликвидуса, нижняя линия  $z$  — кривая солидуса.

П. и кристаллизация играют важную роль в природе: образование снега и льда, вечной мерзлоты, процессы во внутр. слоях Земли, вулканизм, явления. П. — составная часть мн. процессов в технике (произ-во чистых металлов и сплавов, стекла, изделий из них).

Лит.: Френкель Я. М. Кинетическая теория вязкоств., Л., 1975; Дзюбов В. Я. Теория кристаллизации в больших объемах, М., 1975; Тонков В. Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении, М., 1979; Убелов А. Р. Расплавленное состояние вещества, пер. с англ., М., 1982; Смирнов В. П., Козерда В. П. Скользящая кристаллизация переохлажденных жидкостей, М., 1984. В. П. Скрипов. ПЛАВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕТОД (метод Рытова) — приближенный метод решения волнового уравнения или Леонтича параболического уравнения, описывающего распространение волн с учётом дифракции в среде с крупномасштабными (по сравнению с длиной волны  $\lambda$ ) неоднородностями показателя преломления; одна из разновидностей метода возмущений. Предложен С. М. Рытовым в 1937 для решения задачи о дифракции света на УЗ-волне. В дальнейшем П. в м. применялся в разл. статистич. задачах распростра-

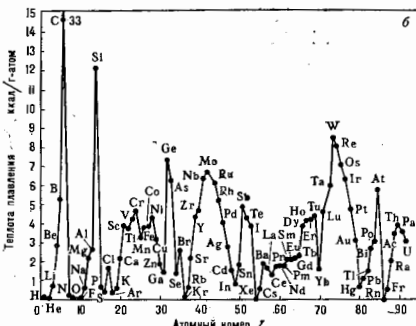
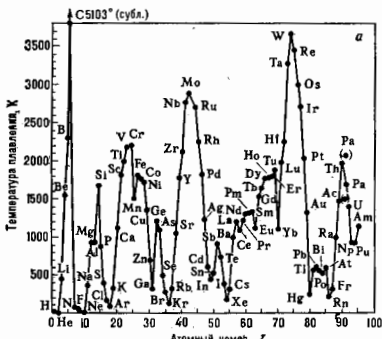


Рис. 2. Зависимость температуры (а) и теплоты (б) плавления элементов от их атомного номера  $Z$ .

ния волн в статистически неоднородных средах (напр., распространение радиоволн, света и звука в турбулентной атмосфере). Суть П. в. м. состоит в том, что теория возмущений строится не для комплексной амплитуды волны, а для комплексной фазы волны, что соответствует частичному суммированию рядов теории возмущений, т. е. определённому учёту многократного рассеяния волн.

Ур-ние П. в. м. для комплексной фазы  $\Phi$ , получаемое из парабол. ур-ния, имеет вид

$$2ik\partial\Phi/\partial z + \Delta_1\Phi + (\nabla_1\Phi)^2 + k^2z(\rho, z) = 0.$$

Решение ищут в виде ряда  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots$  представляющего собой разложение по степеням  $|k|$ . В результате получается система ур-ний последоват. приближений:

$$2ik\partial\Phi_l/\partial z + \Delta_1\Phi_l = f_l, \quad l = 1, 2, \dots,$$

$$f_1 = -k^2z(\rho, z), \quad f_2 = -(\nabla_1\Phi_1)^2,$$

$$f_3 = -2\nabla_1\Phi_1\nabla_1\Phi_2, \dots$$

Граничные условия для  $\Phi_l$  имеют один и тот же вид:  $\Phi_l(\rho, 0) = 0$ . Решение любого из ур-ний можно представить в виде

$$\Phi_l(\rho, z) = \int d\rho' \int dz' K(\rho - \rho', z - z') f_l(\rho', z'),$$

где  $K$  — Грина функция линейного дифференциального оператора  $2ik\partial/\partial z + \Delta_1$ , описывающего дифракцию волн во френелевском приближении. На практике удаётся вычислить лишь нек. первых членов  $\Phi_l$ , обычно используют только  $\Phi_1$ . Условие применимости П. в. м. требует достаточной плавности изменения  $\Phi_1$ , отсюда и происходит название.

Лит.: Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М., 1967; Введение в статистическую радиофизику, ч. 2 — Рытов С. М., Краковин Ю. А., Татарский В. И., Случайные поля, М., 1978; Искажённость и рассеяние и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах, ир. с. язгл., т. 2, М., 1981.  
В. У. Загоринич, П. ПЛАЗМА (от греч. plasma, букв. — выделенное, оформленное) — частично или полностью ионизованный газ, в к-ром плотность положит. и отрицат. зарядов практически одинаковы.

Содержание:

Основные понятия . . . . .	594
Основные свойства . . . . .	595
Движение частиц . . . . .	596
Магнитогидродинамическое описание . . . . .	598
Кинетическое описание . . . . .	597
Классификация взаимодействий . . . . .	597
Линейные волны . . . . .	598
Нелинейные волны . . . . .	599
Методы нагрева . . . . .	599
Излучение плазмы . . . . .	599
Диагностика . . . . .	600
Применения . . . . .	600

Основные понятия

При сильном нагревании любое вещество испаряется, превращаясь в газ. Если увеличивать темп-ру и дальше, резко усиливается процесс термич. ионизации, т. е. молекулы газа начнут распадаться на составляющие их атомы, к-рые затем превращаются в ионы. Ионизация газа, кроме того, может быть вызвана его взаимодействием с эл.-магн. излучением (фотоионизация) или бомбардировкой газа заряж. частицами.

Свободные заряд. частицы, особенно электроны, легко перемещаются под действием эл-трич. поля. Поэтому в состоянии равновесия пространственные заряды входящих в состав П. отрицат. электронов и положит. ионов должны компенсировать друг друга так, чтобы полное поле внутри П. было равно нулю. Именно отсюда вытекает необходимость практически точного равенства плотностей электронов и ионов в плазме — её к в а з и н е й т р а л ь н о с т и. Нарушение квазинейтральности П. в объёме, ею занимаемом, ведёт к

немедленному появлению сильных эл-трич. полей пространственных зарядов, тут же восстанавливающих квазинейтральность. Степенью ионизации плазмы  $\alpha$  наз. отношение числа ионизов. атомов к полному их числу в единице объёма плазмы. В условиях термич. равновесия она определяется *Сага формулой*:

$$\alpha = 1/\sqrt{1+K}; \quad K = N_A \exp(I/kT),$$

где  $I$  — энергия ионизации,  $N_A = n_A^0 \lambda_c^3$  — число частиц всех сортов в кубе с ребром, равным тепловой длине волны де Бройля для электронов  $\lambda_c = h/\sqrt{2\pi m_e kT}$ .

Для *многозарядных ионов* следует учитывать кратность ионизации атомов. В зависимости от величины  $\alpha$  говорят о слабо-, сильно- и полностью ионизованной П.

Ср. энергии разл. типов частиц, составляющих П., могут отличаться одна от другой. В таком случае П. нельзя охарактеризовать одним значением темп-ры  $T$ , и различают электронную темп-ру  $T_e$ , ионную темп-ру  $T_i$  (или ионные темп-ры, если в П. имеются ионы нек. сортов) и темп-ру нейтральных атомов  $T_a$  (см. *Температуры компонент плазмы*). Подобная П. наз. в е з о т е р м и ч е с к о й, в то время как П., для к-рой темп-ры всех компонент равны, наз. и з о т е р м и ч е с к о й.

Применительно к П. несколько необычный смысл (по сравнению с др. разделами физики) вкладывается в понятия «низкотемпературная» и «высокотемпературная». *Низкотемпературной плазмой* принято считать П. с  $T \leq 10^4$  К, а высокотемпературной — с  $T \geq 10^6 \sim 10^8$  К. Это условное разделение связано с тем, что проблема осуществления УТС решается для высокотемпературной П.

В состоянии П. находится большая часть вещества Вселенной — звёзды, звёздные атмосферы, галактич. туманности и межзвёздная среда. Okоло Земли П. существует в космосе в виде *солнечного ветра*, заполняет *магнитосферу Земли* (образуя *радиационные пояса Земли*) и *ионосферу*. Процессы, идущие в окрестной П. обусловлены *магнитными бури* и *полярные сияния*. Отражение радиоволн от ионосферной П. обеспечивает возможность дальней радиосвязи на Земле.

В лаб. условиях и пром. применениях П. образуется в *электрических разрядах в газе* (*дуговым разряде*, *искровом разряде*, *плазменном разряде* и пр.), в процессах горения и взрыва, используется в *плазменных ускорителях*, *магнитогидродинамических генераторах*, в установках для исследования УТС. Мн. характерными для П. свойствами обладают совокупности электронов и дырок в полупроводниках и электронов проводимости, нейтрализуемых неподвижными положит. ионами в металлах, к-рые наз. *плазмой твердых тел*. Её отличит. особенность — возможность существования при сверхнизких для «газовой» П. темп-рах — комнатной и ниже, вплоть до абс. нуля темп-ры. Газовая П. при темп-рах, близких к абсолютному нулю, наз. *криогенной плазмой*.

Возможные значения плотности П. л о х в а т ь ю т о ч ь о ́ ш и р о к и й диапазон: от  $n \sim 10^{-4}$  см<sup>-3</sup> в межгалактич. пространстве и  $n \sim 10$  в солнечном ветре до  $n \sim 10^{22}$  для твёрдых тел и ещё больших значений в центр. областях звёзд.

Термин «П.» в физике был введён в 1929 И. Ленгмюром (I. Langmuir) и Л. Тонком (L. Tonks), проводившим зондовые измерения параметров низкотемпературной газоразрядной П. Киветника П. рассматривалась в работах Л. Д. Ландау (1936 и 1946), А. А. Власова (1938) и др. В 1942 Х. Альвен (H. Alfvén) предложил ур-ния *магнитной гидродинамики* для объяснения ряда явлений в *космической плазме*. В 1950 в СССР А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом, а также Л. Ситенером в США была предложена идея магн. термозащиты П. для осуществления УТС. В 50–80-е гг. изучение П. стимулировалось её разл. практич. применениями,

развитием астрофизики, космофизики (наблюдение комет. П. и объяснение процессов в ней) и физики верхней атмосферы Земли — особенно в связи с полётами комет. летат. аппаратов, а также интенсификацией исследований по проблеме УТС.

### Основные свойства

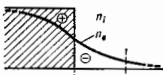
В резком отличии свойств П. от свойств нейтральных газов определяющую роль играют два фактора. Во-первых, взаимодействие частиц П. между собой характеризуется кулоновскими силами притяжения и отталкивания, убывающими с расстоянием гораздо медленнее (т. е. значительно более дальнотедействующими), чем силы взаимодействия нейтральных частиц. По этой причине взаимодействие частиц в П. является, строго говоря, не парным, а коллективным — одновременно взаимодействует друг с другом большое число частиц. Во-вторых, электрич. и магн. поля сильно действуют на П., вызывая появление в ней объёмных зарядов и токов и обуславливая целый ряд специфич. свойств П. Эти отличия позволяют рассматривать П. как особое, «четвёртое» состояние вещества.

К важнейшим свойствам П. относится квазинейтральность. Она наблюдается, если линейные размеры области, занимаемой П., много больше *дебаевского радиуса экранирования*

$$r_D = \sqrt{kT_e \epsilon_1 / 4\pi e^2 n_1 n_2 T_e + n_1 T_i};$$

$e_e$  и  $e_1$  — заряды электронов и ионов,  $n_e$  и  $n_1$  — электронная и ионная плотности; здесь и ниже используется абсолютная Гауссова система единиц. Следовательно, лишь при выполнении этого условия можно говорить о П. как таковой. Электрич. поле отд. частиц в П. экранируется частицами противоположного знака, т. е. практически исчезает на расстояниях порядка  $r_D$  от частицы. Величина  $r_D$  определяет и глубину проникновения веш. электростатич. поля в П. Квазинейтральность может нарушаться вблизи границы П., где более быстрые электроны вылетают по инерции за счёт теплового движения на длину  $\sim r_D$  (рис. 1).

Рис. 1. Нарушение квазинейтральности плазмы на длине порядка дебаевского радиуса экранирования  $r_D$ .



П. наз. и д е а л ь н о й, если потенциальная энергия взаимодействия частиц мала по сравнению с их тепловой энергией. Это условие выполняется, когда число частиц в сфере радиуса  $r_D$  велико:  $N_D = 4/3 \pi n_1 r_D^3 \gg 1$ . В молинии  $T \approx 2 \cdot 10^4 \text{ К}$ ,  $n \approx 2.5 \cdot 10^{19}$  (плотность воздуха) и, следовательно,  $r_D \sim 10^{-7}$  см, но  $N_D \approx 1/10$ . Такую П. называют с л а б о е и д е а л ь н о й.

Помимо хаотич. теплового движения частицы П. могут участвовать в упорядоченных коллективных процессах, из к-рых наиб. характерны продольные колебания пространственного заряда — *ленгмювские волны*. Их угл. частота  $\omega_p = \sqrt{4\pi n e^2 / m}$  наз. плазменной частотой ( $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона). Многочисленность и разнообразие коллективных процессов, отличающие плазму от нейтрального газа, обусловлены дальностью кулоновского взаимодействия, благодаря чему П. можно рассматривать как упругую среду, в к-рой легко возбуждаются и распространяются радиол. шум, колебания и волны. Наличие собств. колебаний и волн — характерное свойство П.

В магн. поле с индукцией  $B$  на частицы П. действует *Лоренца сила*; в результате этого заряд. частицы П. вращаются с циклотронными частотами  $\omega_B = eB/mc$  по ларморовским спиральям (кружкам) радиуса  $r_B = v_{\perp} / \omega_B$ , где  $v_{\perp}$  — перпендикулярная  $B$  составляющая скорости частицы (подробнее см. *Магнитные лоскутки*). В таком взаимодействии проявляется *диамагнетизм*

*лазмы*: создаваемые электронами и ионами круговые токи уменьшают веш. магн. поле; при этом электроны вращаются по часовой стрелке, а ионы — против неё (рис. 2). Магн. моменты таких круговых токов равны  $\mu = mv^2/2B$ , и в неоднородном поле П., как всякое диамагн. вещество, выталкивается из области сильного поля в область более слабого поля, что является важнейшей причиной неустойчивости П. в неоднородных полях.

Взаимные столкновения частиц в П. описываются эфф. поперечными сечениями  $\sigma$ , характеризующими площадь ми-

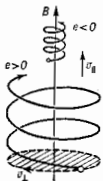


Рис. 2. Вращение электронов и ионов по ларморовским спиральям. Радиус вращения иона ( $e > 0$ ) больше радиуса вращения электрона ( $e < 0$ ).

шени, в к-рую вужно «попасть», чтобы произошло столкновение. Напр., электрон, пролетающий мимо иона на расстоянии *прицельного параметра*  $\rho$  (рис. 3), отклоняется силой кулоновского притяжения на угол  $\theta$ , примерно равный отношению потенциальной энергии

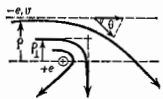


Рис. 3. Электрон, пролетающий мимо иона, движется по гиперболе.  $\theta$  — угол отклонения.

к кинетической, так что  $\theta \approx 2\rho_1/\rho$ , где  $\rho_1 = e^2/mv^2 \approx e^2/kT$  (здесь  $\rho_1$  — прицельное расстояние, при к-ром угол отклонения  $\theta = 90^\circ$ ). На большие углы  $\theta \sim 1$  рад рассеиваются все электроны, попадающие в круг с площадью  $\sigma_{\text{блин}} \approx 4\pi\rho_1^2$ , в-круг можно назвать сечением «близких» столкновений. Если, однако, учесть и дальние пролёты с  $\rho \gg \rho_1$ , то эфф. сечение увеличивается на множитель  $\Lambda = \ln(\rho_D/\rho_1)$ , наз. *кулоновским логарифмом*. В полностью ионизов. П. обычно  $\Lambda \approx 10 - 15$ , и вкладом близких столкновений можно вообще пренебречь. При дальних же пролётах скорости частиц изменяются на малые величины, что позволяет рассматривать их движение как процесс диффузии в пространстве скоростей.

Удобными характеристиками столкновит. процессов являются *длина свободного пробега* частицы  $l = 1/n\sigma$ , число  $\nu$  столкновений  $\nu = n\sigma v$  за единицу времени, а также «время между столкновениями»  $\tau = 1/\nu$ ; однако, в отличие от обычных газов, в П. эти величины оказываются различными для разных процессов. Напр., максвелловское распределение электронов устанавливается за время  $\tau_{ei}$ , а аналогичный процесс для ионов — за большее время  $\tau_{ii} = \tau_{ei} \sqrt{m_i/m_e}$ , выравнивание же электронной  $T_e$  и ионной  $T_i$  темп.-р. т. е. установление максвелловского распределения для П., происходит ещё медленнее — за время  $\tau_{ei} = \tau_{ei} m_i/m_e$ .

Именно различие этих времён позволяет ввести разные темп.-ры для электронов и ионов  $T_e \neq T_i$ , если последний процесс ещё не успел завершиться.

Если в П. не возбуждены к-л. интенсифицированные и неустойчивые, то именно столкновения частиц определяют её т. в. диссипативные свойства — электопроводность, вязкость, теплопроводность и диффузию. В полностью ионизов. П. электропроводность  $\sigma$  не зависит от плотности П. и пропорциональна  $T_e^{3/2}$ ; при  $T \sim 15 \cdot 10^6$  К она превосходит электропроводность серебра, поэтому часто, особенно при быстрых крупномасштабных движениях, П. можно приближённо рассматривать как идеальный проводник, податли  $\sigma \rightarrow \infty$ . Если такая П. движется в магн. поле, то эдс при эфф. любого замкнутого контура, движущегося вместе с П., равна нулю, что по закону Фарадея для эл.-магн.



ивдукция приводит к постоянству магн. потока, пронизывающего контур (рис. 4). Эта заморозенность магнитного поля также относится к важнейшим свойствам плазмы. Ею обусловлена, в частности, возможность самовозбуждения (генерации) магн. поля за счёт увеличения длины магн. силовых линий при хаотич. турбулентном движении среды (см. Гидромагнитное динамо).

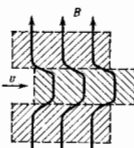


Рис. 4. Движение силовых линий магнитного поля  $B$  вместе с плазмой (связью заморозенности силовых линий);  $v$  — скорость среды.

Напр., в космич. туманностях часто видна волокнистая структура, свидетельствующая о наличии возбуждённого таким способом магн. поля.

Движение частиц

Осн. методами теоретич. описания  $\Pi$  являются: исследование движения отд. частиц  $\Pi$ ; магнитогидродинамич. описание  $\Pi$ ; кинетич. рассмотрение частиц и волн в  $\Pi$ .

В разреженной  $\Pi$ , где можно пренебречь столкновениями, заряд. частица летит со скоростью  $v_0$  вдоль магн. силовой линии, быстро вращаясь по ларморовской спирали (рис. 2). При наличии возмущающей силы  $F$  частица также медленно дрейфует в направлении, перпендикулярном как магн. полю, так и направлению силы  $F$ . Скорость поперечного дрейфа равна  $v_d = c[FB]/eB^2$ , и при этом сила, вызывающая дрейф, в общем случае содержит пять слагаемых:

$$F = mg + eE - \mu \nabla B - n_1 \left( m v_0^2 / R \right) - m \dot{v}_d,$$

каждое из к-рых приводит к соответствующему виду дрейфа — гравитацион., электрич., диамагнитному (в неоднородном поле), центробежному (в искривлённом поле),  $n_1$  — нормаль к силовой линии) и полнорицационному (см. Дрейф заряженных частиц).

В случае  $g = E = 0$  остающиеся диамагн. и центробежные члены в сумме дают дрейф по бинормали со скоростью  $v_d = (v_0^2 + v_0^2/2) / R \omega_D$ , где  $R$  — радиус кривизны силовой линии. В продольном направлении диамагн. сила тормозит частицу, приближающуюся к области более сильного магн. поля. При этом остаются неизменными полная энергия частицы  $m(v_0^2 + v_0^2/2) + e\Phi$  магн. момент  $m = mv_0^2/2B$ , являющийся адiabатич. инвариантом. Таково, напр., движение в магн. поле Земли космич. частиц (рис. 5), к-рые отражаются от полярных областей, где поле сильнее, и вместе с тем дрейфуют вокруг Земли (протоны — на запад, электроны — на восток). Поле Земли является магн. ловушкой, оно удерживает захваченные им частицы в радиационных поясах. Аналогичными свойствами удержания плазмы обладают т. н. зеркальные магн. ловушки, применяемые в исследованиях на УТС (подробнее см. Открытые ловушки). В термоядерных исследованиях используется и другой, «замкнутый» тип магн. ловушки, напр. тороидальная установка токамак

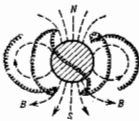
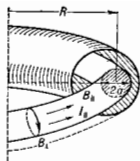


Рис. 5. Движение космических частиц, захваченных магнитным полем Земли.

(рис. 6). В этой установке силовые линии магн. поля имеют вид спирали, навитых на торы, и такой же вид имеют траектории быстрых заряд. частиц. Однако медленные частицы, испытывая дрейф по бинормали,

движутся по поверхности, сечения к-рых имеют очертания бананов или серпов. Такой «банановый» режим разряда возможен в токамаке лишь при малой плотности  $\Pi$ , когда столкновения не мешают движению частиц.



Магнитогидродинамическое описание

При описании  $\Pi$  с помощью ур-ний магн. гидродинамики (МГД), имеющих в идеальном случае вид

$$\rho \dot{v} = -\rho \operatorname{div} v; \rho \dot{v} = -\nabla p + c^{-1}[jB]; p \sim \rho^{\gamma},$$

$\Pi$  рассматривается как сплошная среда, в к-рой могут протекать токи  $j$ . Взаимодействие этих токов с магн. полем  $B$  создаёт объёмную силу Ампера и магн. давление  $P_{\text{маг}} = B^2/8\pi$ , к-рое может уравниваться газодинамич. давлением  $P$ .  $P_{\text{раза}}$ . Ур-ния МГД позволяют рассмотреть разл. течения плазмы, а также равновесные конфигурации  $\Pi$  и их устойчивость. В состоянии равновесия при  $v = 0$  имеем ур-ние  $[jB] = \nabla p$ , к-рое указывает, что сил. линии и линии тока располагаются на поверхностях пост. давления. Для аксиально-симметричных конфигураций удобно пользоваться цилиндрич. координатами  $r, \varphi, z$  и ввести вертикальный (по оси  $z$ ) магн. поток  $\Phi$ , с помощью к-рого осн. ур-ние равновесия можно привести к виду

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = F_1 + r^2 F_2,$$

где ф-ции  $F_1, F_2$  зависят лишь от потока  $\Phi$ . Это ур-ние Града — Шафранова используется при расчётах равновесия тороидальных систем. В термоядерных исследованиях для удержания плазмы кроме токамаков применяют также много др. установок (стеллараторы, амбиоплярные ловушки, винтовые торы и т. д.), в к-рых должны быть выполнены определённые критерии устойчивости  $\Pi$ . Напр., простейший критерий  $\delta B > 0$ , к-рый выполняется в антипротокторнах (см. Открытые ловушки), означает общее требование возрастания магн. поля  $B$  к периферии системы. Это способствует устойчивости плазменного сгустка, т. к. сильное поле снаружи отталкивает  $\Pi$  внутрь в область с более слабым полем. В др. системах он не выполняется, но для систем с замкнутыми силовыми линиями достаточным оказывается более мягкое условие  $\delta \int d\ell / B < 0$ , в к-ром интеграл берётся вдоль силовой линии магн. поля. Для систем с незамкнутыми линиями применяют критерий  $\delta^2 V / dV^2 < 0$  (назв. также условием магн. ямы); вторая производная объёма  $V$  по пронизывающему его продольному магн. потоку  $\Phi$  должна быть  $< 0$ . Др. критерии имеют более частое применение. Напр., для амбиоплярных ловушек, где давление  $\Pi$  анизотропно ( $p_1 \neq p_2$ ), используют критерий устойчивости в виде требования

$$\int \delta B (p_1 + p_2) B^{-2} dl > 0.$$

Для токамаков применяют критерий Крускала — Шафранова в виде  $q = aB/RB_1 > 1$ , где  $R$  и  $a$  — большой и малый радиусы тороидального плазменного шнура. Величину  $q$  называют запасом устойчивости. Наиб. общим магнитогидродинамич. критерием устойчивости произвольного равновесного сгустка  $\Pi$  является т. н. энергетич. принцип, выражаемый условием  $\delta K < 0$ , к-рое содержит вторую производную по времени от полной кинетич. энергии  $\Pi$ .  $K = \frac{1}{2} \int \rho v^2 dV$ . Предполагается, что в нач. момент времени  $t = 0$   $\Pi$  представляет нек-рый вач. «толчок», и если выполнен критерий  $\delta K < 0$ , то последующее движение замедляется, что и указывает на устойчивость (см. также Неустойчивости

плазма). При рассмотрении движения П. методами МГД необходимо учитывать степень вмороженности поля, определяемую магнитным Рейнольдса числом  $N_R = 4\pi L \sigma c^2$ , где  $\sigma$  — электропроводность,  $L$  — характерный размер П. пазера.

Примером неустойчивого равновесия может служить т. н. з-пинч, возникающий при разряде между двумя электродами (рис. 7). Протекание тока по z-пичу является сложным процессом, т. к. в поперечном в нём к-л. электрич. полей вызывает одинаковый дрейф и электронов, и ионов, что само по себе не приводит к току. Ток в пиче возможен лишь за счёт его неоднородности, однако

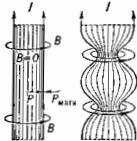


Рис. 7. Образование перетяжки на канале разряда, снятого собственным магнитным полем:  $I$  — ток;  $B$  — индукция магнитного поля, равная нулю внутри разряда.

эта неоднородность приводит к неустойчивости: на поверхности z-пича легко образуются желобки, идущие вдоль магн. поля (желобковая неустойчивость), в быстро нарастают перетяжки, стремящиеся его оборвать (см. *Пич-эффект*). В мощных разрядах с токами  $\sim 10^6$  А в деитериевой плазме такой процесс сопровождается нек-рыми ядерными реакциями и испусканием нейтронов и жестких рентг. лучей, что впервые было обнаружено Л. А. Ардиновичем, М. А. Леонтовичем и их сотрудниками.

Если внутри пича создать продольное магн. поле  $B_z$ , то, двигаясь вместе с П. (из-за вмороженности), оно своим давлением будет препятствовать развитию перетяжек. Условие равновесия пича — равенство газодинамич. и магн. давлений  $p_{\text{газ}} = B^2/8\pi$  (т. е. условие Беннета).

#### Кинетическое описание

Наиб. детальным методом описания П. является кинетический, основанный на использовании ф-ции распределения частиц по координатам и импульсам  $f(t, r, p)$ . В состоянии термодинамич. равновесия эта ф-ция имеет вид универсального Максвелла распределения, а в общем случае её находят из кинетического уравнения Больцмана:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial r} + F \frac{\partial f}{\partial p} = C(f).$$

Здесь  $F = eE + (e/c)[vB]$  — внеш. сила, действующая на заряд. частицу П., а член  $C(f)$  учитывает взаимные столкновения частиц. При рассмотрении быстрых движений П. столкновения часто можно пренебречь, полагая  $C(f) = 0$ . Тогда кинетич. ур-ние наз. б. е. столбиком в тельных ур-н и м. В л. а. с. а с самосогласов. полями  $E$  и  $B$ , к-рые сами определяются движением заряд. частиц (см. *Кинетические уравнения для плазмы*). Если П. полностью ионизована, т. е. в ней присутствуют только заряд. частицы, то их столкновения ввиду преобладающей роли дальних протонтов (см. выше) эквивалентны процессу диффузии в пространстве импульсов (скоростей). Выражение  $C(f)$  для такой П. было получено Л. Д. Ландау и может быть записано в виде

$$C(f) = \nabla(\hat{D}\nabla f) - fF_{\text{дин}}, \quad (*)$$

где  $\nabla = \partial/\partial p$  — градиент в импульсном пространстве,  $\hat{D}$  — тензорный коэф. диффузии в этом же пространстве,  $F_{\text{дин}}$  — сила взаимного (т. н. динамического) трения частиц. При расчётах плазменных потерь в токамаке членом с  $F_{\text{дин}}$  можно пренебречь, а в тензоре  $\hat{D}$  учитывать лишь компоненты, описывающие диффузию только по направлениям скорости.

Кинетич. описание позволяет рассчитать коэф. переноса для таких явлений, как электропроводность, вяз-

кость, теплопроводность и диффузия, к-рые необходимо учитывать в ур-ниях МГД в условиях, когда столкновения играют существенную роль. Электропроводность П. примерно равна  $\sigma = \tau_{ee} ne^2/m_e$ , а др. коэф. — температуропроводности, кинематич. вязкости и диффузии можно оценить по единой ф-ле

$$\chi \sim \nu \sim D \approx l^2/\tau,$$

если в П. нет магн. поля ( $l$  — длина свободного пробега). Если же оно присутствует и достаточно велико, так что выполнено условие  $\omega_p \gg l$  («магнитная» П.), то длину свободного пробега в преобладающей ф-ле следует заменить на ларморовский радиус электронов либо ионов в зависимости от того, какие частицы участвуют в рассматриваемом процессе. В термоядерных установках определяющую роль играет группа т. и. захваченных частиц, имеющих малую продольную скорость и захватываемых неоднородностями магн. поля. Напр., в токамаке такие частицы описывают «банановые» траектории, и для них коэф. диффузии определяется не ларморовским радиусом, а размером «банана». Кроме того, следует учитывать, что столкновения переводят частицы из состояния «запертых» в состояние «пролетных» и наоборот, и этот процесс определяет эфф. значение времени  $\tau_{\text{эфф}}$  в коэф. диффузии. Такая теория процессов переноса в П., учитывающая геометрию магн. поля, наз. неоклассической, и она хорошо описывает потери ионов (см. *Перенос процессы в плазме*). Во мн. случаях, однако, в П. могут рождаться мелкие «вихри» и возбуждаться интенсивные колебания. Тогда реальные процессы переноса определяются не столкновениями, а величиной, уровнем этих колебаний, как это имеет место, напр., в токамаке для электронов. Такие потери наз. аномальными.

#### Классификация взаимодействий

При высоких темп-рах и низкой плотности П. можно пренебречь столкновениями частиц с частицами. Однако в случае, когда в П. возбуждены волны к-л. типа (см. ниже), необходимо учитывать *взаимодействие частиц с волнами*. При не слишком больших амплитудах колебаний в П. подобные «столкновения», как и при дальних протонтах, сопровождаются малыми изменениями импульса частиц и член  $C(f)$  сохраняет свой «диффузионный» вид с тем отличием, что коэф.  $\hat{D}$  определяется интенсивностью волн. Важнейшим результатом кинетич. описания П. является учёт взаимодействия волн с группой т. н. резонансных частиц, скорости к-рых совпадают со скоростью распространения волны. Именно эти частицы наиб. эффективно обмениваются с волной энергией и импульсом. В 1946 Ландау предсказал возможность основного на таком обмене бесстолкновительного затухания ленгмюровских волн, впоследствии обнаруженного в опытах с П. (*Ландау затухание*). Если в П. направить доплонит. лучок частот, то подобный обмен может приводить не к затуханию, а к усилению волн.

По аналогии с кватовой электродинамикой разл. типы взаимодействий в П. удобно изображать графически, подобно диаграммам Фейнмана, на к-рых сплошная ломаная линия означает частицу, волнистая линия изображает волну к-л. типа, а пересечение этих линий образует «узел». По числу узлов различают процессы первого порядка, второго, третьего и т. д., условно изображённые в таблице (рис. 8).

Две диаграммы первого порядка изображают процесс излучения и по-



Рис. 8. Графическое изображение различных типов взаимодействия частиц и волн в плазме.

глощения волн частями, к-рый описывается т. н. квазилинейной системой ур-ний

$$\frac{dN}{dt} = 2\gamma N; \frac{d\mathbf{f}}{dt} = \nabla(\mathbf{D}\nabla\mathbf{f}); \mathbf{D} = \int \mathbf{k}kN\omega d\mathbf{k},$$

где  $N$  — число квантов, пропорц. интенсивности волны,  $\omega$  — вероятность спонтанного излучения кванта,  $\mathbf{k}$  — волновой вектор. Эти ур-ния описывают турбулентность в магн. полях; предполагается, что они могут описывать процесс ускорения частиц, входящих в состав космических лучей.

Верхняя диаграмма II порядка изображает кулоновское столкновение двух частиц, упомянутое ранее, а нижняя диаграмма указывает, что частица вначале поглощает один квант (или взаимодействует с полем), а затем испускает другой (или вызывает рассеяние; условно изображает сразу 4 важных процесса: рассеяние лазерного луча в плазме (метод их рассеяния на кулоновских полях ионов; поглощение циклотронной волны частицей в магн. поле (циклотронный нагрев II.); циклотронное излучение частиц, закручиваемых магн. полем.

Среди возможных диаграмм III порядка наиб. важной оказывается диаграмма, изображающая т. н. распадные процессы — распад волны на две другие волны или, наоборот, — слияние двух волн в одну. В таких распадных процессах должны соблюдаться законы сохранения энергии и импульса квантов:

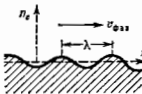
$$\hbar\omega_1 = \hbar\omega_2 + \hbar\omega_3, \quad \hbar\mathbf{k}_1 = \hbar\mathbf{k}_2 + \hbar\mathbf{k}_3.$$

Если эти законы не выполняются, то трёхволновые распадные процессы оказываются запрещёнными и на первый план выступают четырёхволновые процессы, изображаемые диаграммой IV порядка. Примером таких четырёхволновых процессов может быть взаимодействие волн на воде, приводящее к зависимости частоты волн от амплитуды  $a$  по ф-ле Стокса  $\omega^2 = kg(1 + k^2a^2)$ . Аналогичные нелинейные процессы возможны и в П., напр. модуляц. неустойчивость ленгмюровских волн (см. ниже), при к-рой частота также зависит от амплитуды.

### Линейные волны

Волны в П. отличаются объёмным характером и разнообразием свойств. С помощью разложения в ряд Фурье любое малое возмущение в П. можно представить как набор монохроматич. волн простейшего сциллоидального вида (рис. 9) с частотой  $\omega$ , длиной волны  $\lambda$  и фазовой скоростью  $v_{ф}$ . Кроме того, волны могут

Рис. 9. Синусоидальный профиль плотности электронов в монохроматической плазменной волне.



различаться поляризацией, т. е. направлением вектора  $\mathbf{E}$  электрич. поля в волне. Если это поле направлено вдоль скорости распространения, волна наз. продольной, а если поперёк — поперечной. В П. без магн. поля возможны волны трёх типов: продольные ленгмюровские с частотой  $\omega_p$ , продольные звуковые (точнее, ионно-звуковые) волны со скоростью  $v_{зв} = \sqrt{T_e/m_i}$  и поперечные эл.-магн. (световые или радиоволны) с частотой  $\omega = \sqrt{\omega_p^2 + k^2c^2}$ .

Поперечные эл.-магн. волны могут обладать двумя поляризациями и могут распространяться в П. без магн. поля, только если их частота  $\omega$  превышает плазменную частоту  $\omega_p$ . В противоположном же случае  $\omega < \omega_p$  показатель преломления плазмы становится мнимым и поперечные волны отражаются её поверхностью (см. *Волны в плазме*). (Именно поэтому радиовол-

ны с  $\lambda > 20$  м отражаются ионосферой, что обеспечивает возможность дальней радиосвязи на Земле.)

Однако при наличии магн. поля поперечные волны, резонируя с ионами и электронами на их циклотронных частотах, могут распространяться внутри П. и при  $\omega < \omega_p$ . Это означает появление в П. ещё двух типов волн, наз. альвеновскими и быстрыми магнитозвуковыми.

Альвеновская волна представляет собой поперечное возмущение, распространяющееся вдоль магн. поля со скоростью  $v_A = B/\sqrt{4\pi n_i m_i}$  ( $m_i$  — масса иона). Её природа обусловлена возможностью и упругостью слопых линий, к-рые, стремясь сократить свою длину и будучи нагружены частицами П., в частности массивными ионами, колеблются подобно натянутому струнам.

Быстрая магнитозвуковая волна в области малых частот по существу лишь поляризацией отличается от альвеновской (их частоты близки и определяются магн. полем и иверней тяжёлых ионов). Скорость магнитозвуковой волны в области малых частот равна

$$v_+ = \frac{1}{2}(|v_A + v_{зв}| + |v_A - v_{зв}|).$$

В области больших частот, где волны можно считать неподрезанными, она определяется инерцией электронов и имеет спешифич. винтовую поляризацию. Поэтому её называют геликоидной ветвью колебаний или ветвью Вилстеров (свистов), поскольку в магнитосферной П. она проявляется в виде характерных свистов при радиосвязи (см. *Атмосфера*). Кроме того, в П. может распространяться медленная магнитозвуковая волна, к-рая представляет собой обычную звуковую волну с характеристиками, несильно изменёнными магн. полем. Её скорость равна

$$v_- = \frac{1}{2}(|v_A + v_{зв}| - |v_A - v_{зв}|).$$

Т. о., при наличии магн. поля в однородной П. возможны волны шести типов: три высочастотные и три низкочастотные. Зависимость квадрата показателя преломления  $N = kc/\omega$  от частоты для этих шести волн схематически изображена на рис. 10.

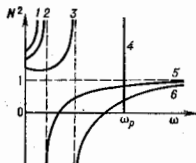


Рис. 10. Шесть типов волн в плазме при наличии магнитного поля: 1 — ионно-звуковая; 2 — альвеновская; 3 — быстрая магнитозвуковая (вильстер); 4 — ленгмюровская; 5 — обыкновенная электромагнитная; 6 — обыкновенная.

Если тем-ра или плотность П. в магн. поле неоднородны, то возникают ещё т. н. дрейфовые волны со скоростью  $v_d = v_T R_{EM}$ , где  $x = \sqrt{n/n_0}$  (см. *Дрейфовые неустойчивости*).

В неравновесной П. при определённых условиях возможна раскачка неустойчивостей, т. е. нарастание к.-л. из перечисленных типов волн до некого уровня насыщения. Возможны и более сложные случаи индуциров. возбуждения волн одного типа за счёт энергии волн др. типа. При больших амплитудах возможны *бесконечительные ударные волны* (возбуждаемые, напр., на границе магнитосферы набегающим на Землю солнечным ветром), *удрежные волны (солитоны)*, а также ряд др. нелинейных волн и сильно развитая *турбулентность плазмы*.

Электрич. поле  $\mathbf{E}$  возбуждает в П. индуциров. ток  $j_{инд} = \sigma \mathbf{E}$ . Это соотношение наз. *Ома обобщённым законом*, а тензор  $\hat{\sigma}$  — тензором электропроводности. Наиб. удобной характеристикой электропроводности, свойств П. является тензор диэлектрич. проницаемости

$\hat{\epsilon} = \hat{f} + 4\pi i\omega^{-1}\hat{\sigma}$ . В частности, все перечисленные типы волн в П. определяются из детерминанта  $|\hat{\epsilon} + \hat{N}\hat{N} - \hat{1}|N^2| = 0$ , позволяющего найти закон дисперсии  $\omega = \omega(\mathbf{k})$ , т. е. зависимость частоты  $\omega$  от волнового вектора  $\mathbf{k}$  для к.-л. определённой волны. В П. без магн. поля тензор  $\hat{\epsilon}$  фактически содержит лишь две независимые величины  $\epsilon_{\parallel}$  и  $\epsilon_{\perp}$ . В магн. поле необходимо рассматривать все компоненты  $\epsilon_{\alpha\beta}$  тензора, наиб. точно определяемые из решения указанного выше кинетич. ур-ния.

### Нелинейные волны

В линейном приближении амплитуды всех волн формально считаются бесконечно малыми, их взаимодействие не учитывается и для них выполняется *суперпозиции принцип*. Однако любая реальная волна имеет конечную амплитуду, и картина, даваемая линейной теорией, может не соответствовать действительности. Взаимодействие волн учитывается с помощью нелинейных ур-ний, к-рые в сложных случаях можно решить лишь численными методами. Часто, однако, в результате упрощений (напр., рассматривая волну, бегущую лишь в одном направлении) нелинейные ур-ния в П. удаётся свести к нек-рым хорошо изученным канонич. нелинейным ур-ниям, допускающим полную интегрируемость при любых нач. условиях. Напр., разл. волны со слабой дисперсией хорошо описываются *Кортевега — де Фриса уравнением* (КДФ)

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + v \frac{\partial \psi}{\partial x} + a \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0,$$

частым решением к-рого является солитон  $v = v_0/\text{ch}[(x - v_0 t)/L]$ , где  $v_0$  — скорость солитона, а  $L$  — его ширина. Решается также задача об эволюции узкого пакета волн к.-л. типа в случае, когда их частота зависит от амплитуды. Напр., частота ленгмювской волны с учётом дисперсии и нелинейной зависимости от амплитуды определяется ф-лой  $\omega = \omega_p(1 + k^2 r_D^2 - \epsilon z^2)$ , где  $\epsilon = 1/2 \pi p_0$ , и эта ф-ла эквивалентна *Шрёдингеру уравнению* *нелинейному*

$$i\omega_p \frac{\partial E}{\partial t} - E + r_D \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \epsilon |E|^2 = 0,$$

допускающему волновое решение. В приближении длинных волн (т. е. для волн, длина к-рых больше к.-л. характерного параметра П.) мн. неустойчивости плазмы описываются нелинейными ур-ниями вида

$$\dot{\rho}_{\text{эфф}} = -\rho_{\text{эфф}} \text{div} \hat{v}; \quad \dot{\hat{v}} = \hat{c}_0 m \nabla \rho_{\text{эфф}} / m,$$

также допускающим аналитич. решение. Эти ур-ния отличаются от ур-ний движения идеального газа лишь знаком в правой части, поэтому их называют квази-газовыми или квазициклотронными (С. А. Чаплыгин в 1896 впервые рассмотрел эти ур-ния с  $m = -1/2$ ). Параметр  $m$ , как правило, оказывается либо целым, либо полуцелым, а роль «эффективной плотности»  $\rho_{\text{эфф}}$  в разных случаях могут играть разные величины. Эти ур-ния описывают нелинейные перегибы на плазменном явчце ( $m = -1$ ). При  $m = -1/2$  они описывают аperiodич. параметрическое неустойчивость П. во внеш. колеблющемся поле, биевмавовской неустойчивости П. при сверхтепловом потоке электронов, а также разрывную тиринг-неустойчивость *негравитационного токового слоя*, развивающегося на отд. явчце вследствие *пересоединения* магн. силовых линий (возможно в токамаках, в хвосте магнитосферы Земли, а также в плазменной атмосфере Солнца при вспышках). При  $m = 1$  указанные ур-ния описывают различное рода *модуляционные неустойчивости* в П. — колдас ленгмювских волн, разбегание электронного пучка в П. да струйки, слои и шти. Теми же квази-газовыми ур-ниями описываются солитоны мн. типов, являющиеся решениями КДФ ур-ий, *Кадомова* —

*Петшиашвили уравнения*, а также кноудальные волны. Напр., солитоны, описываемые ур-нием КДФ, в приближении длинных волн ведут себя подобно идеальному одноатомному газу. Решения квазициклотронных ур-ий в многомерном случае могут быть автономного типа  $v \sim r/t$  (см. *Автомобильность*), а в одномерном неавтономном или в двумерном стационарном случаях исходные нелинейные ур-ния могут быть сведены к двум линейным ур-ниям для обратных ф-ций, и более того — к простому ур-нию Лапласа  $\Delta \psi(\mathbf{r}, t) = 0$  в своеобразном трёхмерном фазовом пространстве, что и показывает возможность их полной интегрируемости при любых нач. условиях.

### Методы нагрева

Термоядерная реакция слияния ядер дейтерия и трития  $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,6 \text{ МэВ}$  эффективно протекает при темп-рат  $\sim (1-2) \cdot 10^8 \text{ К}$  и выполнении *Лоусона критерия*  $n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$ , где  $\tau$  — время жизни П. Для достижения столь высоких темп-р используются след. методы *нагрева плазмы*: джоулевым теплом, адиабатич. сжатием, инжекцией высокоэнергетич. частиц, за счёт поглощения разл. волн (электронных и ионных циклотронных, альвеновских и нижнегибридных), лазерным облучением и пучками релятивистских электронов. После зажигания термоядерной реакции образующиеся энергетич.  $\alpha$ -частицы, задерживаемые магн. полем, должны обеспечить «самонагрев П.» и последующее самоподдержание реакции. Коэф. поглощения и трансформации разл. волн в П., определяющие эффективность нагрева, находятся из мнимых (антзиримовых) компонент тензора диэлектрич. проницаемости  $\hat{\epsilon}$ . При малой длине волн поглощение происходит обычно на нек-рой поверхности, где выполнены условия резонанса. При нагреве П. инжекцией энергии  $\hat{e}$  отд. быстрых частиц, пронизывающих П., уменьшается по ф-ле  $\partial \hat{e} / \partial t = -\hat{e} \hat{v}$  вследствие столкновений и излучения их волн. При интенсивных потоках частиц возможно образование ударных волн, также нагревающих П. (напр., при иабегании плазменного солнечного ветра на магнитосферу Земли). При лазерном облучении мпшней важную роль играет явление абляции — быстрого испарения поверхностного слоя с последующим «эффектом отдачи», приводящим к сжатию центр. части «таблетки» термоядерного топлива, что должно облегчить выполнение критерия Лоусона (см. *Лазерный термоядерный синтез*).

### Излучение плазмы

Спектр излучения низкотемпературной (напр., газоразрядной) П. состоит из отд. спектральных линий (линейчатый спектр). В газосветных трубках наряду с ионизационной и электр. джоуль, а в *рекомбинационном излучении* со спектром в виде широких полос.

Для высокотемпературной П. со значит. степенью ионизации характерно *термич. излучение* с непрерывным рентг. спектром, возникающее при столкновениях электронов с ионами. Уд. мощность излучения указанных трёх типов можно записать в виде  $W = A n_e n_Z g(T) [Вт/см^3]$ , где  $A = 0,5 \cdot 10^{-30}$ , а множитель  $g(T)$  для каждого из типов излучения равен соответственно:

$$g_{\text{ли}} = 1,25 Z^3 \text{ при } T < T_1 = (Z/16)^2;$$

$$g_{\text{рек}} = Z^2/200 T [\text{кэВ}] \text{ при } T_1 < T < T_2;$$

$$g_{\text{гор}} = Z^2 \sqrt{T} [\text{кэВ}] \text{ при } T > T_2 = (Z/6)^2.$$

Здесь  $Z$  — заряд иона, а  $n_Z$  — их плотность.

В магн. поле ларморовское вращение электронов П. приводит к появлению л. и магнитотормозного излучения (*синхротронное излучение, циклотронное излучение*) на гармониках циклотронной частоты, особенно существующее при больших (релятивистских) **599**

энергиях электронов. В термоядерных условиях можно считать, что один электрон излучает мощность  $kT/\tau$ , где время излучения равно  $\tau [c] = 250 V^{-2} [ГэВ]$ . Все электроны густота ( $N_e$ ) излучали бы мощность  $W = N_e kT/\tau$ , однако значительная её часть поглощается внутри самой П., в отличие от термоядного излучения, свободно выходящего наружу (см. также *Излучение плазмы*). Как показывают численные расчёты, из плазменного шара радиуса  $a$  наружу выходит лишь небольшая доля  $K$  суммарной циклотронной мощности, причём, равная  $K = 60V\sqrt{t/p}$ , где  $t = kT/mc^2$ ,  $p = \omega_0^2 / \omega_{pe}^2$  — безразмерные параметры. Номер макс. циклотронной гармоники, излучаемой с поверхности П., можно оценить по ф-ле  $n_{max} = 7\sqrt{t/p}^{1/4}$ .

Важную роль в космич. плазме играет вынужденное излучение типа обратного Комптона эффекта. Им, а также магнитотормозным механизмом обусловлено излучение нек-рых космич. туманностей, напр. Крабовидной.

Корпускулярным излучением П. наз. быстрые частицы, вылетающие из неравновесной П. в результате развития ряда типов неустойчивостей. В первую очередь в П. возникают к.-л. характерные колебания, энергия к-рых затем передаётся небольшой группе резонансных частиц (см. выше). По-видимому, этим механизмом объясняется ускорение малознергичных космич. частиц в атмосфере Солнца и в туманностях.

### Диагностика

Существует неск. методов диагностики П., т. е. определение её параметров. Помещая в плазму электр. зонд (маленький электрод) и регистрируя зависимость тока от подаваемого напряжения, можно определить темп-ру и плотность П. С помощью миниатюрной индукц. катушки — магн. зонда — можно измерять изменение магн. поля во времени. Эти способы связаны, однако, с активным вмешательством в П. и могут ввести нежелат. возмущения. К более чистым методам относятся просвечивание П. пучками нейтральных частиц в радиоволнах. Лазерное просвечивание П. в разл. вариантах, в т. ч. с использованием голографии, является навб. тонким и к тому же локальным методом лаб. диагностики П.

Часто используют пассивные методы диагностики — наблюдение спектра излучения П. (единств. метод в астрономии), вывод быстрых нейтральных атомов, образовавшихся в результате *перезарядки ионов* в П., измерение уровня радиошума. Плотную П. изучают с помощью сверхкороткой киносъёмки (неск. млн. кадров в с) и *развёртки оптической*. В исследовании по УТС регистрируются также рентг. спектр тормозного излучения и нейтронное излучение дейтериевой П. (см. также *Диагностика плазмы*).

### Применения

Высокотемпературная П. ( $T \sim 10^8 K$ ) из дейтерия и трития, а также изотопа гелия  $^3He$  — осн. объект исследований по УТС.

Низкотемпературная П. ( $T \sim 10^6 K$ ) находит применение в газоразрядных источниках света и в газовых лазерах, в *термомиссионных преобразователях* тепловой энергии в электрич. и в *магнитогидродинамических генераторах*, где струя П. тормозится в канале с доперечным магн. полем  $B$ , что приводит к появлению между верх. и ниж. электродами (рис. 11) электрич. поля напряжённостью  $E \sim V_0/c$  ( $v$  — скорость потока

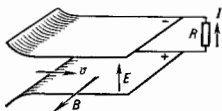


Рис. 11. Схема магнитогидродинамического генератора, преобразующего кинетическую энергию движущейся плазмы в электрическую энергию.  $B$  — внешняя поперечная магн. индукция,  $v$  — скорость потока плазмы,  $I$  — ток.

П.); напряжением с электродов подаётся во внеш. цепь.

Если «обратить» МГД-генератор, пропуская через П. в магн. поле ток от внеш. источника, образуется плазменный двигатель, весьма перспективный для дальних космич. полётов.

*Плазмотроны*, создающие струи плотной низкотемпературной П., широко применяются в разл. областях техники. В частности, с их помощью режут и сваривают металлы, наносят покрытия. В *плазмосиловых* низкотемпературную П. используют для получения нек-рых хим. соединений, напр. галогенидов инертных газов, к-рые не удаётся получить др. путём. Кроме того, высокие темп-ры П. приводит к высокой скорости протекания хим. реакций — как прямых реакций синтеза, так и обратных реакций разложения. Если производить синтез «на пролёте» плазменной струи, расширяя и тем самым быстрее охлаждая её на след. участке (такая операция наз. *закалкой*), то можно затормозить обратные реакции разложения и существенно повысить выход требуемого продукта.

Лит.: А. Льюэн Х., Фельдхаммер К.-Г., Космич. антропогенез, пер. с англ., 2 изд., М., 1967; Гинзбург В. Д., Распространение электромагнитных волн в плазме, 2 изд., М., 1967; Арцихилович Л. А., Элементарная физика плазмы, 3 изд., М., 1969; Вопросы теории плазмы, в. 1—18, М., 1963—90; Сингх Р. Д., Физика полностью ионизованного газа, пер. с англ., М., 1965; Трубиных В. А., Введение в теорию плазмы, в. 1—3, М., 1969—78; Трубиных В. А., Горючая плазма и управляемый ядерный синтез, М., 1975; Основы физики плазмы, под ред. А. А. Галеева, Р. Султанова, т. 1—2, М., 1983—84; Чен Ф., Введение в физику плазмы, пер. с англ., М., 1987; Жданов С. К., Трубиных В. А., *Квантовые неустойчивые среды*, М., 1991.

В. А. Трубиных

**ПЛАЗМА ТВЕРДЫХ ТЕЛ** — совокупность подвижных участвующих в электропереносе носителей заряда, взаимодействующих посредством кулоновских сил. Эти силы, описываемые, как правило, с помощью самосогласованных эл.-магн. полей, приводят к коллективному характеру движения заряд. частиц — осн. признаку *плазмы*. В отличие от газовой плазмы, все компоненты к-рой (электроны, ионы, нейтральные атомы) подвижны, ионы и атомы, входящие в состав твёрдого тела, совершают лишь малые колебания относительно положений равновесия, а в качестве подвижных носителей заряда, образующих П. т. т., выступают лишь нек-рая часть электронов. Последние движутся в самосогласов. поле в условиях, во-первых, сильного взаимодействия с атомами (ионами) кристаллич. решётки, формирующего их энергетич. спектр (см. *Зонная теория*), и, во-вторых, столкновений с примесями и дефектами кристаллич. решётки и с её колебаниями. Эти столкновения служат интенсивным каналом релаксации возбуждений П. т. т., отсутствующим в газовой плазме. Др. отличие состоит в более высокой концентрации носителей заряда в П. т. т. ( $10^{15}—10^{18}$  см $^{-3}$  в полупроводниках и полуметаллах и  $10^{22}—10^{23}$  см $^{-3}$  в металлах).

П. т. т., как и газовая плазма, в среднем электрически нейтральна из-за компенсации зарядов разных знаков; вследствие временных флуктуаций плотности электрич. заряда в ней возникают плазменные или ленгмювские колебания электронов, частота к-рых (для предельно длинных волн) определяется ф-лой (см. *Волны в плазме*):

$$\omega_p^2 = 4\pi e^2 n/m\epsilon. \quad (1)$$

Здесь  $e$  — заряд электрона,  $n$  — концентрация носителей заряда,  $m$  — их масса,  $\epsilon$  — диэлектрич. проницаемость среды.

Если электронейтральность П. т. т. нарушена введением неподвижных сторонних зарядов, то их электр. поле смещает подвижные заряды, обеспечивая экранирование этого поля. Характерный пространств. масштаб экспоненциального затухания поля даётся т. н. длиной экранирования  $\lambda_D$ , равной

(по порядку величины) длине пробега носителей за период пламенных колебаний:

$$\Lambda = \bar{v}/\omega_p \quad (2)$$

( $\bar{v}$  — ср. скорость носителей). В вырожденной плазме длина экранирования наз. *дебаевским радиусом экранирования*

$$\Lambda_D = ekT_n/4\pi e^2 n. \quad (3)$$

Здесь  $T_n$  — темп-ра носителей заряда. В вырожденной плазме длина экранирования (радиус Томаса — Ферми) определяется ф-ой

$$\Lambda_{FT} = e\mathcal{E}_F/3kT_n, \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}_F$  — ферми-энергия. В действительности на расстояниях  $r > \Lambda_{FT}$  экспоненциальное затухание потенциала  $r^{-2} \exp(-r/\Lambda_{FT})$  сменяется т. н. осцилляциями Фридриха и Ландау, затухающими по закону  $r^{-3} \cos(2\pi r/\lambda + \varphi)$ , где  $p_r$  — фермиевский импульс электронов.

Как и в случае др. возбуждённых состояний твёрдых тел (фононы, магноны, экситоны и т. д.), при описании пламенных колебаний электронов вводят квазичастицу, наз. плазмоном, с энергией  $\hbar\omega_p(q)$  и импульсом  $\hbar q$ , где  $q$  — волновой вектор.

Отклик П. т. т. на нерезонансное электрич. поле описывается зависимостью от частоты поля  $\omega$  и его волнового вектора  $q$  диэлектрической проницаемости  $\epsilon(\omega, q)$ . Закон дисперсии пламенных колебаний для конечных длин волн  $\lambda$  определяется из условия  $\epsilon(\omega, q) = 0$ . В частности, ф-лы (1—4) следуют из приближённых выражений

$$\epsilon(\omega, q) = \begin{cases} 1 - (\omega_p/\omega)^2 = 0, & q \rightarrow 0, \\ 1 + (\Lambda q)^2 = 0, & \omega \rightarrow 0. \end{cases} \quad (5)$$

Диэлектрич. проницаемость П. т. т. — тензор, причём в отличие от газовой плазмы в П. т. т. это обусловлено не только внем. магн. полем, но и кристаллич. структурой твёрдого тела.

Для описания пламенных явлений в твёрдых телах обычно решают систему ур-ний, включающую Максвелла уравнения и кинетическое уравнение, позволяющее рассмотреть процессы релаксации, учесть тепловое движение носителей, а также квантовые эффекты. Более детальное многочастичное рассмотрение учитывает взаимодействие носителей на близких расстояниях, а гидродинамич. подход следует из кинетич. описания при рассмотрении плазных и низкочастотных ал.-магн. возмущений.

Металлы. Плазма типичных металлов — сильно вырожденная электронная ферми-жидкость, описание к-рой требует использования многочастичных методов и учёта структуры энергетич. зон. Однако мн. свойства простых металлов, в к-рых электроны проводимости принадлежат атомным  $s$ - и  $p$ -оболочкам, могут быть описаны в рамках т. н. модели «желе», когда кристаллич. решётка заменяется однородно размещённым положит. зарядом явон, на фоне к-рого колеблются электроны. Концентрация электронов  $n$  фактически является единств. параметром модели, т. к. в этом случае в (1)  $\epsilon = 1$ , а  $m$  — масса свободного электрона. Из-за высоких л. частот  $\omega_p \approx 10^{18}$  с<sup>-1</sup>, а энергия плазмона  $\hbar\omega_p$  для большинства простых металлов 5—25 эВ (в Na 5 эВ; в Mg 11 эВ, в Al 16 эВ).

В типичных металлах плазмоны — самые высокоэнергетич. возбуждения. Плазмоны исследуют измеряя спектры характеристик. потерь энергии быстрых электронов (с энергиями  $\geq 1$  кэВ), проходящих сквозь металл. фолгу, и неупругое рассеяние ал.-магн. волн (свет, *синхротронное излучение*). Если изменение импульса влетающего электрона мало по сравнению с фермиевским импульсом электронов металла  $p_F$ , то имеет место коллективный режим рассеяния, при к-ром

первичные электроны теряют энергию на возбуждение плазмонов. Интенсивность потерь энергии пропорциональна  $\text{Im}\epsilon^{-1}(q, \omega)$ . Эта величина имеет максимум при  $\mathcal{E}(\omega, q) = 0$ , что отвечает возбуждению плазмона. Зависимость потерь энергии от угла рассеяния позволяет определить закон дисперсии плазмона. В модели «желе» он определяется ф-лой

$$\omega^2(q) = \omega_p^2 + \frac{3}{5}(v_F q)^2 + \dots \quad (6)$$

Дисперсия пламенных колебаний обусловлена давлением сжимаемой электронной жидкости, возникающим вследствие хаотич. движения электронов (мера к-рого — фермиевская скорость  $v_F = p_F/m$ ). Дисперсия пламенных колебаний демонстрирует их волновой характер: в плазме распространяются продольные волны, групповая скорость к-рых линейно растёт с ростом  $q$ . В экспериментах проявляется не учитываемая моделью «желе» зависимость  $\omega_p$  от направления  $q$ , существенная при больших  $q$ .

С ростом переданного импульса (с увеличением угла рассеяния) спектр характеристик. потерь первичных электронов «размывается». Это обусловлено тем, что при фазовой скорости плазмона  $\omega_p/q \leq v_F$  «включается» механизм бесстолкновительного Ландау затухания, т. е. процесс передачи энергии плазмона одночастичным возбуждением — элементом проводимости. Предельное волновое число, определяющее область существования плазмонов, равно  $q_c \approx \omega_p/v_F$  (рис. 1), что в соответствии с (2) даёт  $q_c \approx \Lambda_{FT}^{-1}$ . Т. к.  $\Lambda_{FT}$  обычно не превышает постоянной решётки, то строгое рассмотрение затухания плазмонов требует многочастичного описания.

Модель «желе» описывает ещё один тип возбуждений в металлах (анало-

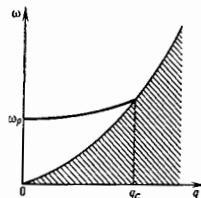


Рис. 1. Закон дисперсии плазмонов в металле (иридий кристалл). Затеняемая область — одночастичные возбуждения; вблизи  $q_c$  плазмоны сильно затухают.

гичный ионному звуку в газовой плазме), соответствующий медленным колебаниям ионного «желе», экранированного электронами. Закон дисперсии этих возбуждений (в ДВ-пределе)  $\omega(q) = sq$ ; здесь  $s = v_F(M/3M)$ , где  $Z$  и  $M$  — валентность и масса иона. Это продольные звуковые волны в металле (поперечный звук модель «желе» не описывает).

В реальных металлах заметную роль играет взаимодействие электронов (многочастичные эффекты). Их вклад значителен при большой величине параметра  $r_s = (a_n/n)^{1/3}$  ( $a_n$  — борковский радиус), приближённо равного отношению потенциальной энергии взаимодействия электронов (на 1 электрон) к  $\mathcal{E}_F$ . В простых металлах  $1,8 < r_s < 5,6$  и многочастичные эффекты дают, как правило, существенные количеств. поправки к описанной картине. Качественно взаимодействие электронов проявляется, напр., в существовании *спиновых волн* в ферромагн. металлах.

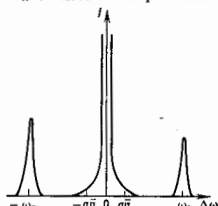
Полупроводники. Своеобразие полупроводников (полуметаллов) состоит в существовании двух отличающихся по частоте пламенных мод. ВЧ-мода обусловлена колебаниями всех электронов валентной зоны и аналогична плазменным колебаниям в простых металлах. Колебания этой моды также проявляются в характеристич. потерях быстрых электронов, а их частота может быть вычислена по ф-ле (1), где  $n$  — концентрация электронов в валентной зоне (равная произведению обратного атомного объёма на число валентных электронов). Энергии плазмонов — продольных

колебаний валентных электронов относительно ионного основания обычно  $\sim 14-17$  эВ и намного превосходит ширину запрещенной зоны полупроводника  $\epsilon_g$ .

НЧ-мода обусловлена колебаниями электронов проводимости или дырок. В случае полупроводника с одним типом валентных носителей  $\omega_p$  находится из ф-лы (1), где  $m$  — эфф. масса носителей заряда,  $\epsilon$  — диэлектрич. проницаемость полупроводника,  $n$  — концентрация носителей. Плазменные колебания в этом случае — колебания газа свободных носителей относительно хаотически расположенных в кристаллич. решётке ионизов. донорных или акцепторных примесных центров. Энергия плазмонов  $\hbar\omega \sim 0,01-0,1$  эВ, что соответствует субмиллиметровому или ИК-диапазону. Такие плазмоны могут возбуждаться термически, причём подобно фононам они являются бозонами.

НЧ-плазмоны исследуют экспериментально, используя комбинационное рассеяние света. Падающие фотоны возбуждают или поглощают плазмоны, что соответствует стоксовой и антистоксовой линиям спектра (рис. 2). По спектру и углу распределения рассеянного излучения находят  $\omega_p(q)$ . При  $q\lambda \ll 1$  имеет место рассеяние

Рис. 2. Зависимости интенсивности  $I$  рассеянного излучения от изменения его частоты  $\Delta\omega$  в коллективном режиме ( $q\lambda \ll 1$ ); 0 соответствует частоте накачки,  $\pm\omega_p$  — частотам рассеянного излучения, соответствующим поглощению или возбуждению плазмонов.



на плазмонах; при  $q\lambda \geq 1$  плазмоны подавлены затуханием Ландау, а рассеянный свет образует широкую полосу  $\Delta\omega \sim qv$ , где  $v$  — ср. скорость носителей.

НЧ-плазмоны затухают также из-за рассеяния носителей заряда на примесях, фононах и т. д., «сбивающего» коллективный характер их движения. Поэтому дополнит. условие их существования

$$\omega_p \tau_p \gg 1, \quad (7)$$

где  $\tau_p$  — время релаксации импульса носителей заряда (определяющее их подвижность  $\mu$ ). Это условие ограничивает (снизу) концентрацию носителей, при к-рых могут существовать плазмоны. При низких концентрациях носителей, когда  $\omega_p \tau_p \lesssim 1$ , нач. отклонение от электронеutralности не приводит к плазменным колебаниям, а периодически затухает за время макс. в д л о в с к о й р е л а к с а ц и и:

$$\tau_m = (\omega_p^2 \tau_p)^{-1} = \epsilon / 4\pi e n \mu.$$

Соотношение (7) выведено при  $\tau_m \ll \tau_p$ . Условие возбуждения плазмонов можно записать в виде  $\Lambda \ll l \ll \bar{v} \tau_p$ , где  $l$  — длина свободного пробега носителей,  $\bar{v}$  — их ср. скорость.

Многокомпонентная плазма возникает в полупроводниках и подметаллах, содержащих неск. групп носителей заряда (электроны и дырки разных долин в многодолинных полупроводниках, лёгкие и тяжёлые дырки и т. д.). Обычно энергетич. спектр таких полупроводников анизотропен; следствием анизотропии  $m$  и  $\epsilon$  является анизотропия  $\omega_p$ . Напр., в одноосных кристаллах плазмоны, распространяющиеся вдоль и поперек осей, имеют разную частоту. В многодолинных полупроводниках электроны разных долин образуют многокомпонентную плазму, в к-рой моды существовать дополнит. моды плазменных колебаний.

Др. примером многокомпонентной плазмы является электроно-дырочная (б и о л я р и а н) плазма в по-

лупметаллах, содержащих равное кол-во вырожденных электронов и дырок, и в собств. полупроводниках. Частота ВЧ-плазмы в биполярной плазме определяется ф-лой (1), куда входит приведённая масса, равная  $m_+ m_- / (m_+ + m_-)$ , где  $m_+$  — эфф. масса электронов,  $m_-$  — эфф. масса дырок. Электроны и дырки движутся в противофазе, как в продольных оптич. колебаниях ионных кристаллов (см. *Колебания кристаллической решётки*).

НЧ-акустич. ветвь (электроны и дырки движутся синфазно) аналогична ионно-звуковым модам в газовой плазме. Акустич. плазменная мода (дырочный звук) возникает из-за колебаний тяжёлых дырок, вслед за к-рыми движутся, экранируя их, лёгкие электроны. Такие плазмоны имеют линейный закон дисперсии  $\omega_p = vq$ . Если фазовая скорость  $v$  определяется ср. геометрическим фермиевских скоростей вырожденных электронов  $\bar{v}_e$  и дырок  $\bar{v}_h$ , они слабо затухают, если эти скорости (или массы  $m_+$  и  $m_-$ ) сильно различаются. Если дырки не вырождены, то фазовая скорость равна  $\bar{v}_p (m_+ / 3m_-)^{1/4}$ . Звуковые моды возникают и в многодолинных полупроводниках, где продольные и поперечные массы сильно отличаются.

Возможность внеш. воздействием (обычно оптич. возбуждением) изменять плотность электроно-дырочной плазмы при фиксиров. темп-ре позволяет изменять её фазовое состояние. При высоких темп-рах и концентрациях электроны и дырки образуют электронный газ, вырожденный в области IIIа и невырожденный в области IIIб (рис. 3). С понижением  $T$  при малых  $n$  электроны и дырки связываются в экситоны (область II). При промежуточных плотностях электроны и дырки конденсируются в электроно-дырочные капли, разделённые экситонами (область Iа) или электроно-дырочными (область Iб) газом низкой плотности. Сами же капли являются металлич. ферми-жидкостью высокой плотности (см. *Экситонная жидкость*).

Низокоразмерные системы. Наличие границ раздела изменяет картину плазменных явлений. Так, у границы проводник — вакуум возникает по в е р х н о с т н ы й п л а з м о н — возбуждение, затухающее в

глубь среды, частота к-рого в  $\sqrt{2}$  меньше частоты объёмного плазмона  $\omega_p$ . Дисперсия этих плазмонов определяется зависимостью частоты от двумерного волнового вектора  $q_{||}$ , лежащего в плоскости поверхности. Поверхностный плазмон содержит наряду с продольной поперечную составляющую электр. поля, нормальную к поверхности.

В квазидвумерных системах электроны или дырки, локализованные в обогащённых или *ишерсонных* слоях (*гетеропереходов*, *МДП-структур* и др.), образуют двумерную плазму, заряд к-рой скомпенсирован зарядом противоположного знака на удалённом электроде. В этих условиях могут возбуждаться двумерные плазмоны, частота к-рых

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 n_s q_{||}}{m(\epsilon_{\perp} + \epsilon_{\parallel})}. \quad (8)$$

Здесь  $n_s$  — концентрация носителей в слое на единицу его площади,  $q_{||} \ll p_F / \hbar$ ,  $\epsilon_{\perp}$ ,  $\epsilon_{\parallel}$  — диэлектрич. проницаемости сред по разные стороны слоя. Двумерные плазмоны имеют необычный закон дисперсии:  $\omega_p \sim \sim q_{||}^{1/2}$ . Их можно возбуждать поперечной эл.-магн.

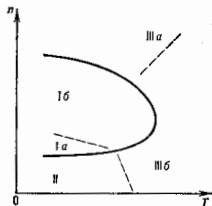


Рис. 3. Фазовая диаграмма электроно-дырочной плазмы на плоскости концентрации носителей — температура.

волной дальнего ИК-диапазона, т. е. аналогично поверхностным плазмам у них есть поперечная составляющая электрич. поля; время релаксации квазидвумерных электронов  $\tau_p$  может быть большим из-за ослабления рассеяния на компенсирующей концентрации примеси, к-рая пространственно отделена от электронов. Благодаря этому условие (7) выполняется для более низких частот.

Возможность управлять концентрацией  $n_p$  в МДП-структурах позволяет изменять  $n_p$  до значений, соответствующих в гетероструктурной кристаллографии (см. *Визнерский кристалл*).

Плазма в магнитном поле. В сильном магн. поле  $H$  электроны проводимости движутся по спирали с осью, параллельной  $H$ . В проекции на плоскость, перпендикулярную  $H$ , это движение по окружностям с циклотронной частотой  $\omega_c = eH/mc$ . Поэтому магнетоплазма уже не является чисто продольной волной, а содержит и поперечные составляющие. В пренебрежении запаздыванием спектр магнетоплазмы определяется из дисперсионного уравнения  $\epsilon(\omega, q) = 0$ , где  $\epsilon$  — тензор диэлектрич. проницаемости. При  $q \perp H$  частота магнетоплазмы

$$\omega_{MP}(q) = \sqrt{\omega_p^2(q) - \omega_c^2}, \quad (9)$$

где  $\omega_p$  — частота плазмы при  $H = 0$ . Влияние поля  $H$  наиб. существенно для НЧ-плазм в полупроводниках, когда  $\omega_c \geq \omega_p$  (для  $n$  — GaAs при концентрации электронов  $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $\omega_c = \omega_p$  при  $H = 80 \text{ кГс}$ ).

Поперечные эл.-магн. волны, падающие извне на П. т., могут распространяться лишь при определенных соотношениях между их частотой  $\omega$  и  $\omega_p$ . При  $\omega \gg \omega_p$  волны распространяются при  $\omega > \omega_p$ . Фазовая скорость  $v_{ph}$  этих волн выше скорости света  $c$  в среде ( $v_{ph} = c/\sqrt{\epsilon}$ ) и неограниченно возрастает при  $\omega \rightarrow \omega_p$ , а их групповая скорость  $v_{gr} \rightarrow 0$ . При  $\omega < \omega_p$  поперечные волны не распространяются — колеблющиеся в такт с волной носители заряда излучают вторичную волну, компенсирующую падающую, и амплитуда поля волны экспоненциально сходает в глубь плазмы. При  $\omega_p < \omega < 1$  происходит поглощение волны.

Сильное магн. поле ( $\omega_c \tau_p \gg 1$ ) изменяет описанную картину. Т. к. носители заряда движутся по спирали, вращаясь вокруг  $H$ , то вдоль магн. поля при  $\omega < \omega_c$  распространяется циркулярно поляризов. поперечная эл.-магн. волна (вектор  $E$  вращается в направлении вращения электронов), наз. *геликоном*.

В биполярной плазме при точном равенстве концентраций электронов и дырок геликоны отсутствуют (выпад электронов компенсируется вкладом дырок, вращающихся навстречу), поэтому геликоны не распространяются в полуметаллах и неких металлах. Однако в замagnetизированной П. т. могут распространяться волны др. типов: альфеновские, магнитозвуковые, циклотронные, доплеровые и др. Альфеновские и магнитозвуковые моды аналогичны тем же волнам в газовой плазме (см. *Волны в плазме*). Циклотронные волны и доплеровые специфичны для сильно вырожденной плазмы металлов.

Концентрационные эффекты в биполярной плазме. Наличие в составе плазмы и электронов и дырок позволяет неравновесно варьировать плотность плазмы в целом; можно «накачивать» биполярную плазму практически до любой плотности, удаляя её из части образца или из образца в целом, перемещая к (или от) заданной внеш. поверхности, а также изолировать от поверхности в глубине образца.

Одн. способом варьирования концентрации биполярной плазмы являются оптич. качачка (фотогенерация электронно-дырочных пар), ударная ионизация в сильном электрич. поле, кошпигная двойная инжекция носителей заряда. Ограничивает неравновесный рост

концентрации вынос (экслюзия) электронно-дырочных пар из образца в контакты и их рекомбинация в объеме образца или на его поверхности (см. *Контактные явления в полупроводниках, Полупроводниковый лазер*).

При контактной инжекции или при локальной фотогенерации распределение пар по образцу осуществляется благодаря *амбиполярной диффузии*, а при пропускании через образец тока — благодаря биполярному дрейфу. Биполярный дрейф имеет место в примесном полупроводнике, где концентрация электронов  $n$  отличается от концентрации дырок  $p$ , причём направление дрейфа в электрич. поле  $E$  определяется знаком разности  $p - n$ . Именно благодаря дрейфу возможен токовый переход неравновесной концентрации на большие расстояния, оцениваемые длиной биполярного дрейфа:

$$L = \frac{\mu_n \mu_p}{\mu_n + \mu_p} \cdot \left( \frac{p - n}{p + n} \right) E \tau.$$

Здесь  $\mu_n, \mu_p$  — подвижности электронов и дырок,  $\tau$  — их время жизни, определяемое скоростью рекомбинации.

Ток, проходящий через плазму, является источником неоднородного магн. поля, действующего на носители, образующие плазму, и изменяющего их движение в электрич. поле. В монопольной плазме это приводит к собств. *магнетосопротивлению*. В биполярной плазме наряду с ним возникают также перераспределение концентраций и магн. пинч-эффект. Сила Лоренца, действующая на носители, направлена всегда так, чтобы сжать исходную однородную плазму в шнур, — биполярная плазма отрывается от поверхности образца, диаметр к-рого с ростом тока уменьшается, а плотность плазмы растёт. Сжимаемому действию сил Лоренца противостоит амбиполярная диффузия (см. *Шнурование тока в полупроводнике*).

В пластинах толщиной  $d > y > 0$  с током может наблюдаться т. э. электрич. пинч-эффект. Если вдоль направления тока  $I$  направить ось  $z$ , то для существования электрич. пинча необходимо отличие от 0 в осях  $x, y$  неоднородной составляющей подвижности хотя бы для одного из сортов носителей [т. е.  $\mu_{xxy} \neq 0$  и (или)  $\mu_{xyx} \neq 0$ ]. Тогда одно только поперечное (анизотропное) поле  $E_y$ , образуемое при пропускании тока  $I$ , не может индуцировать одновременно как электрич. ток, так и дырочный поперечный ток. Плазма прижимается к одной из двух поверхностей, образуя там аккумулятивный слой за счёт поперечного выноса из объёма.

Недипольные составляющие подвижности носителей в изотропной плазме можно создать приложением поперечного магн. поля с индукцией, лежащей в плоскости пластин (магнитоконцентрац. эффект). Если в собств. полупроводнике плазма исходно занимает почти однородно пластину, то этот эффект называют эффектом Велькера, а в случае плазмы, инжектированной из контакта, расположенного на одной из поверхностей образца, — эффектом Сула. Др. способом получения  $\mu_{xxy} \neq 0$  в изотропной плазме является малая анизотропная деформация образца (сжатие или растяжение).

Неустойчивости плазмы. Начиная с нек-рого критич. значения электрич. тока, протекающего через П. т., её стационарное состояние перестаёт быть устойчивым. Это означает, что некие электрич. флуктуации не затухают во времени, а неограниченно растут. Результатом является либо разрушение образца, либо возникновение новой устойчивой временной и пространственной электронной структуры. Механизмы неустойчивости в плазме полупроводников, где наряду с заметными пространственно-временными изменениями дрейфовой скорости носителей заряда возможны и вариации их концентраций. В металлах таких условий нет.



Электрич. доменная неустойчивость. Ток  $j$  «разогревает» газ носителей, темп-ра  $T_n$  становится выше темп-ры решетки  $T$  (см. *Горячие электроны*). Изменение  $T_n$  вызывает изменение времён релаксации. В результате зависимость тока  $j$  от напряжённости  $E$  электрич. поля (вольт-амперная характеристика, ВАХ) становится нелинейной, на ней появляются «падающие» участки, к-рым соответствует отрицат. дифференциальное сопротивление (рис. 4) П. т. т. Возникающая неустойчивость наз. перегретой.

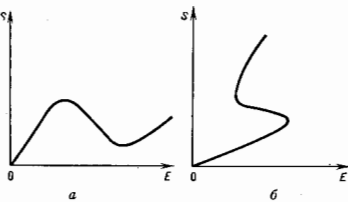


Рис. 4.  $N$ -образная (а) и  $S$ -образная (б) вольт-амперные характеристики.

Др. причина появления падающего участка на ВАХ — изменение концентрации носителей вследствие зависимости ср. времени их захвата на примесный уровень от  $T_n$  (рекомбинат. неустойчивости). К ВАХ  $N$ -типа (рис. 4, а) приводит также «потяжеление» носителей с ростом их энергии. Причины потяжеления: неэластич. зависимость энергии носителей от их импульса; существование наряду с осн. минимумом (долиной) зоны проводимости энергетически более высоких долин, в к-рых эфф. масса носителей значительно больше. При разогрете носители переходят в верх. долины, где их подвижность существенно ниже (междолинная неустойчивость).

Однородное состояние П. т. т. на падающих участках неустойчиво относительно роста флуктуаций, приводящих в конечном счёте к неоднородной структуре. При ВАХ  $N$ -типа нарастание флуктуаций приводит к расщеплению плазмы с образованием областей (доменов) сильного электрич. поля на фоне слабого поля в остальной части образца. Эти домены могут быть как локализованными около катода или анода (или у неоднородности образца), так и двигаться (от катода к аноду в случае электронной плазмы) со скоростью порядка дрейфовой скорости электронов в электрич. поле домена. Зарождение движущегося домена на катоде и гибель его на аноде приводит к осцилляциям напряжения на образце (*Ганна эффект*).

При ВАХ  $S$ -типа (рис. 4, б) нарастают флуктуации, приводящие к шунтированию тока. С ростом тока происходит расширение токового шпура вплоть до заполнения им всего поперечного сечения образца. Поперечное магн. поле вызывает движение токового шпура в поперечном направлении с «таблеткой» его на противоположной поверхности. «Зарождением» в противоположной поверхности. В биодородной горячей плазме ВАХ не имеет падающего участка, т. к. изменение концентрации носителей при их разогрете маскирует изменение их подвижности (к-рое при неизменной концентрации приводило бы в однородном случае к отрицат. дифференц. сопротивлению). В результате образуются многотрусовые и (или) многодоменные структуры.

**Рекомбинационные волны.** Кроме свободных электронов и дырок, полупроводники содержат носители, захваченные глубокими примесными центрами, причём энерг. ядра электронов  $\tau_e$  и дырок  $\tau_h$  относительно их захвата различны. В результате, начиная с нек-рого порогового значения  $E_n$  электрич. поля, и образце возникают волны концентрации свободных и связан-

ных носителей заряда, а также электрич. поля, распространяющиеся либо вдоль направления движения осн. носителей, либо в противоположную сторону. При  $E > E_n$  помимо стоячей волны колеблющейся концентрации носителей образуется приконтактный домен сильного поля, на к-ром падает б. ч. напряжения.

Витовая неустойчивость развивается в пространстве неоднородной биполярной плазме полупроводников, помещённой в параллельные друг другу электрич. (токовые) и магн. поля, начиная с нек-рого порогового значения произведения  $EH$ . При нестройной параллельности  $E$  и  $H$  за счёт поперечной составляющей  $H$  возникает магнитоцентрикат. эффект (см. выше). Развитие этой неустойчивости приводит к генерации образом электрич. колебаний во внеш. цепи.

Пространственно-временные структуры, образующиеся вследствие развития неустойчивости П. т. т., характеризуются непрерывным притоком в неё энергии от внеш. источника и непрерывной её диссипацией во внеш. среду. К диссипативным структурам приводит помимо токовых неустойчивостей неустойчивость под воздействием интенсивного эл.-магн. излучения, интенсивного потока тела при большом градиенте  $T$  и др. Общим во всех случаях является существование критич. значения параметра, характеризующего уровень возбуждения П. т. т. (ток, мощность излучения,  $\Delta T$  и т. п.).

Переход П. т. т. в результате неустойчивости в состояние диссипативной пространственно-временной структуры может быть описан на языке неравновесного фазового перехода. Как правило, с изменением уровня возбуждения П. т. т. исчезают нек. неравновесных фазовых переходов, в результате к-рых одни диссипативные структуры заменяются другими. Примерами этих структур являются колебания концентрации носителей и (или)  $T$ . Часто эти колебания сопровождаются изменением тока, проходящего через П. т. т. (в случае токовых неустойчивостей), так что П. т. т. в сочетании с внеш. электрич. полем выступает как генератор электрич. колебаний. Др. примером служат *инжекционный лазер*, где в результате инжекции электронов и дырок создается биполярная плазма высокой плотности с инвертиров. заполнением электронных состояний в зоне проводимости по отношению к валентной зоне. Возникновение когерентного эл.-магн. излучения может быть описано как неравновесный фазовый переход.

Др. результатом развития неустойчивости могут быть статич. диссипативные структуры в виде распределения параметров П. т. т. в пространстве (напр., периодического). Элементами пространств. структур обычно являются домены и доменные стенки. В пространственно-временных структурах происходит движение доменов и доменных стенок, их колебания около нек-рых положений равновесия, пульсация параметров плазмы в домене и размеров домена. Домены Ганна и шпуры — примеры диссипативных структур.

Развитие неустойчивостей иногда приводит к неупорядоченным (стохастич.) структурам. Начиная с нек-рого высокого уровня возбуждения, П. т. т. переходит в состояние, к-рое может быть описано в вероятностной форме. Напр., генератор периодич. колебаний становится генератором неравновесного шума с большой амплитудой. Описание упорядоченных и стохастич. пространственно-временных структур происходит на основе решения одной и той же нелинейной динамич. задачи (см., напр., *Странный аттрактор*).

Лит.: Пайяс Д., Элементарные возбуждения в твердых телах, пер. с англ., М., 1963; Платман Ф., Вольт Ф. П., Волны и взаимодействия в плазме твердого тела, пер. с англ., М., 1975; Пожева Ю. К., Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках, М., 1977; Владимирова В. В., Волков А. Ф., Мейлихов Е. З., Плазма полупроводников, М., 1979; Винославский С. В., Киндильский М. И., Навастова физика твердого тела, М., 1983; Маричи Н. И., Исламов И. М., Коллективные эффекты в твердых телах и жидкостях, пер. с англ., М., 1986. Ф. Т. Васильев, З. С. Грибышюк.

**ПЛАЗМА ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНЫХ ГАЗОВ** — частично ионизованный газ, в к-ром кроме электронов  $n$  положит. ионов содержится отрицательные ионы. Атомы и молекулы газов, обладающие высокими энергиями *средства к электрону* (соединения  $F_2, Cl_2, I_2$ ), в плазме легко образуют отрицат. ионы и приводят к созданию ион-ионной плазмы. Эта плазма имеет высокую эл. прочность и используется поэтому в качестве газонаполнителя в высоковольтных электроаппаратах. При меньших энергиях средства наряду с отрицат. ионами в плазме присутствуют также свободные электроны.

Отношение  $\alpha$  концентрации  $n^-$  отрицат. ионов к концентрации  $n_e$  электронов ( $\alpha = n^-/n_e$ ) является очень важной для П. э. г. величиной, определяющей мн. её свойства. Эта величина и её изменение в пространстве определяют структуру разряда в электроотрицат. газах. С ростом  $\alpha$  уменьшается самосогласов. поле, и при  $\alpha > 10$  величина поля обусловлена в основном ион-ионным взаимодействием. Коэф. амбиполярной диффузии заряд. частиц в П. э. г. также зависит от  $\alpha$ . С увеличением  $\alpha$  коэф. диффузии электронов в плазме возрастает и при  $\alpha > 10-40$  достигает насыщения, т.е. становится равным коэффициенту свободной диффузии электронов. Независит. изменение тока или давления газа в П. э. г. может привести к возрастанию или уменьшению этого отношения, что сопровождается изменением радиального диффузионного потока заряд. частиц. Так, при  $\alpha > 10$  диффузионный поток электронов настолько увеличивается, что в разряде концентрация электронов практически становится неизменной на участке от оси до стенки трубки.

Свойства плазмы молекулярного электроотрицат. газа зависят от степени диссоциации молекул. С ростом плотности атомов возрастает частота отщипывания электронов от отрицат. ионов, что ведёт к уменьшению отношения концентрации отрицат. ионов к электронам, увеличению самосогласов. поля, действующего между заряд. частицами, уменьшению диффузионного потока электронов и т. п.

Процессы образования и разрушения отрицат. ионов в плазме могут привести к развитию разл. неустойчивостей в разряде, таких, как прилипательная и доменная неустойчивости. Если в разряде возникает положит. флуктуация поля, в результате к-рой скорость прилипания превышает скорость образования электронов, и это возмущение ориентировано поперек тока, то в *положительном столбе* развивается и р и л и п а т е л ь н а я неустойчивость и он сжимается. Возникновение этой неустойчивости можно объяснить из анализа ур-ния баланса электронов

$$\operatorname{div} D_a \operatorname{grad} n_e = (v - \beta) n_e$$

( $D_a$  — коэф. амбиполярной диффузии,  $v$  и  $\beta$  — коэф. ионизации и прилипания соответственно) и ур-ния теплопроводности. Повышение давления газа (т.е. плотности  $N$  нейтральных частиц) или разрядного тока приводит к возрастанию частоты столкновений электронов с нейтральными частицами и установлению градиента темп-ры газа, вследствие чего параметр  $E/N$  ( $E$  — продольное эл. поле) станет переменным вдоль поперечного сечения плазменного столба. Т.к. частота ионизации зависит от  $E/N$  экспоненциально, а прилипания зависит слабо, то области образования и рекомбинации заряд. частиц окажутся пространственно разделёнными. В узкой приосевой области столба, где частота ионизации значительно превышает частоту прилипания ( $v > \beta$ ), будут образовываться электроны. На периферии, где  $E/N$  меньше, чем на оси, и потому  $v < \beta$ , электроны, диффундирующие из центральной области, будут прилипать к нейтральным частицам, образуя отрицат. ионы, к-рые затем эффективно рекомбинируют вследствие ион-ионного взаимодействия. Положит. столб тлеющего разряда неустойчив, если на его периферии  $v - \beta \leq 0$ . Развитие этой неус-

тойчивости в разряде электроотрицат. газов приводит к контракции положит. столба при меньших значен. токов и давлений, чем в электроположит. газах.

Рассмотрим развитие до м е и о н и е у с т о й ч и в о с т и. Пусть в положит. столбе разряда где-то повысилась концентрация электронов. Параметр  $E/N$  и темп-ра электронов в этом месте уменьшатся, что вызовет уменьшение частоты прилипания электронов, но не изменит частоту отщипывания, не дав измениться от  $E/N$ . В результате нарушения баланса этих двух процессов возрастёт число электронов, поступающих в плазму, и, следовательно, разрядный ток. Из-за нарушения баланса прилипания и отщипывания начёт уменьшится концентрация отрицат. ионов, их плотность достигнет мин. значения и поступление электронов за счёт отщипывания прекратится. Разрядный ток, достигший макс. значения, начёт уменьшиться из-за уменьшения поступления электронов, к-рое далее приведёт к росту частоты ионизации и медленному повышению частоты прилипания. При мин. величине разрядного тока отношение  $E/N$  примет наиб. значение и вследствие того, что при этом  $v$  будет быстро нарастать, начёт рост тока и т. д.; происходит чередование снижения и возрастания величины тока, т.е. модуляции разрядного тока. В разряде образуются бегущие слои (домены). Доменная неустойчивость возникает при  $\alpha \geq 0,1$ .

Лит.: См и р н о в В. М., Отрицательные ионы, М., 1978; Г а л е ч и н Г. А., Свойства плазмы электроотрицательных газов, в сб.: Химия плазмы, в. 7, М., 1980. Г. А. Галечин.

**ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ** — совокупность методов получения и обработки материалов с использованием нагрева исходных продуктов в плазменной струе или их перевода в плазменное состояние.

Наиб. широкое распространение получили атмосферные (при норм. давлении) плазменные методы обработки и получения материалов (резание, наплавка, выращивание монокристаллов, сфероидизация порошков, нанесение покрытий), а также проведения многотоннажных плазменных процессов (получение связанного азота и др.). Эти процессы осуществляются с помощью потоков плазмы, генерируемых *плазмотронами* разл. типов (электродными, высокочастотными). Плазма в этих устройствах выполняет ф-цию высокотемпературного теплоносителя и используется в осн. для нагрева исходных продуктов.

В 1980-х гг. получили эфф. развитие ионно-плазменные технол. процессы, реализующиеся в вакууме с помощью *плазменных ускорителей*. В качестве рабочих тел могут быть использованы металлы, газы, твёрдые и жидкие диэлектрики. В этих условиях возможны такие процессы, как насыщение пористых слоёв материала др. веществом с обеспечением необходимой толщины насыщенного слоя или глубины его заделки, высокоэффективное распыление поверхности, конденсация вещества в вакууме из плазменной фазы при обеспечении органич. связи материалов основы и покрытия и необходимых структурных особенностей плазменного конденсата.

Реализация разл. ионно-плазменных технол. процессов, осуществляемых в условиях высокой чистоты, принципиально необходима для получения мн. спец. материалов, определяется широкими возможностями управления параметрами взаимодействующих плазменных потоков. Это позволяет получать разл. структуры плазменных конденсатов — от аморфных до кристаллических, с разными размерами и формой кристаллитов.

П. т. включает ряд чрезвычайно важных, экономически высококонтрабельных процессов нанесения износостойких, жаропрочных, коррозионно-стойких и др. плазменных покрытий. Благодаря этому возможна замена дорогостоящих и редких металлов и сплавов менее дефицитными материалами с нанесёнными на них покрытиями без изменения (или даже со значит. повышением) ресурса работоспособности изделий. Ис-

пользования П. т. приводит к формированию принципиально новых композиц. материалов, свойства к-рых не определяются простым суммированием характеристик основы и покрытия, а являются качественно новыми.

При формировании покрытий широко используется перевод исходных продуктов в плазменное состояние с помощью вакуумной дуги. Катодные микропятна *дугового разряда* являются источниками высокоскоростных потоков илазмы, содержащей продукты эрозии катода. Стенки ионизации образующегося плазменного потока достаточно велика (от 20 до 90% в зависимости от материала катода); навб. долю в нём составляют двухзарядные ионы. Ионные токи дугового разряда аномально высокие — до 10 ампер и более (ок. 10% тока разряда).

Управление потоками плазмы вакуумной дугой (транспортировка, фокусировка, сепарация от нейтральных частиц и макрочастиц катодного материала) осуществляется путём использования дополнит. устройств, действующих на принципах плазмооптики (см. *Плазмооптические системы*).

При конденсации потоков плазмы тяжёлых металлов (титан, молибден, цирконий и т. п.) в присутствии реактивного газа (азота) синтезируются нитриды этих металлов, к-рые обладают высокими показателями по твердости, износостойкости и адгезии к металлу. основе. Осн. параметры, определяющими свойства образующегося конденсата, являются хим. состав исходного материала (катода), парциальное давление реактивного газа, темп-ра подложки при конденсации, энергия ионов, плотность плазменного потока. При повышении давления азота до оптим. значений увеличивается микротвёрдость формируемых покрытий, что обусловлено образованием твёрдых растворов азота и нитридов с достаточно широкой областью гомогенности. Зависимость свойств образующихся конденсатов от давления реактивного газа позволяет формировать покрытия с заданным градиентом свойств по толщине, а также создавать многослойные покрытия чередованием высотовёрдых и «мягких» (исходный материал) слоёв. Возбуждённое состояние компонентов плазмы обеспечивает протекание плазмохим. реакций образования нитридов тугоплавких металлов (карбидов при использовании углеродосодержащих газов) при сравнительно низких темп-рах подложки, что позволяет наносить эти покрытия на материалы с низкой темп-рой отпуска; традиц. методы получения нитридов и карбидов требуют длит. времени и высоких темп-р (см. также *Плазмохимия*).

При конденсации потоков углеродной плазмы в вакууме па поверхности охлаждаемых металлич. подложке получены алмазоподобные покрытия. Ионно-плазменный метод синтеза позволяет получать такие покрытия толщиной до неск. десятков микрон. Физ. свойства алмазоподобных углеродных покрытий близки по свойствам к алмазу. Микротвёрдость плёнок по Виккерсу достигает  $(15-18) \cdot 10^9$  кг/см<sup>2</sup>, плотность —  $2,9-3,2$  г/см<sup>3</sup>, электросопротивление —  $10^8$  Ом·см. Плёнки химически инертны к сильным окислителям, как и алмаз. Синтез в предельно неравновесных условиях композиц. высокодефектного углеродного материала, состоящего из смеси высокодисперсных алмазных кристаллитов, углеродных второй фазой выделяемых высокодисперсного графита, позволяет надеяться на получение новых конструкц. материалов с ещё лучшими свойствами, чем свойства известных форм алмазов.

Синтезравные методами П. т. высокотовёрдые, прочные, стабильные покрытия успешно используются в качестве упрочняющих покрытий для режущих инструментов (быстрорежущие стали и твёрдые сплавы) и деталей машин. Это позволяет существенно (в 2-8 раз) повысить эксплуатацион. ресурс упрочняемых изделий.

Лит.: Паданяна В. Г., Толок В. Т., Методы плазменной технологии высоких энергий, «Атомная энергия», 1978, т. 44, с. 476; Дороднов А. М., Технологические плазменные ускорители, «ЖТФ», 1978, т. 48, в. 9, с. 1858; Алексеев И. И. и др., Высокоэффективный источник чистой углеродной плазмы, «ЖТФ», 1980, т. 50, в. 9, с. 2000; Плазменная металлизация в вакууме, Минск, 1983. В. Г. Паданяна.

**ПЛАЗМЕННАЯ ЧАСТОТА** — частота ленгмювских колебаний, называемых также плазменными колебаниями и продольными ( $k \parallel E$ ) колебаниями пространственного заряда  $\omega_p = \sqrt{4\pi n e^2 / m_e}$ ,  $n$  — плотность,  $e$  и  $m_e$  — заряд и масса электрона,  $k$  — волновой вектор,  $E$  — электрич. поле, вызываемое разделением зарядов. В холодной плазме ( $T_e = T_i$ ) ленгмювские колебания не обладают дисперсией, т. е. П. ч.  $\omega_p$  не зависит от длины волны. Подробнее см. в ст. *Волны в плазме*. **ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА** — раздел физики плазмы, изучающий коллективные взаимодействия плотных потоков (лучков) заряд. частиц с плазмой и газом, приводящие к возбуждению в системе линейных и нелинейных эл.-магн. волн и колебаний, и использование эффектов такого взаимодействия. Прикладные задачи, к-рые ставит и решает П. э., определяются её осн. разделы: плазменная СВЧ-электроника, изучающая возбуждение в плазме интенсивного когерентного эл.-магн. излучения, начиная от радио- и вплоть до оптич. диапазона длин волн; плазменные ускорители, осн. на явлении коллективного ускорения тяжёлых заряд. частиц электронными пучками и волнами в плазме; *плазменно-лучковая разряд*, основанный на коллективном механизме взаимодействия плотных лучков заряд. частиц с газом; турбулентный нагрев плазмы плотными пучками заряд. частиц и коллективные процессы при транспортировке и фокусировке пучков в проблеме УТС (см. *Ионный термоядерный синтез*); неравновесная *плазмохимия*, изучающая процессы образования возбуждённых молекул, атомов и ионов при коллективном взаимодействии пучков заряд. частиц с газом и плазмой.

**Историческая справка.** П. э. возникла после открытия А. И. Ахиезером и Я. Б. Файнбергом (1948), Д. Бомом (D. Bohm) и Э. Гроссом (E. P. Gross, 1949) явления пучковой неустойчивости, представляющего собой вынужденное черенковское излучение плотным моноэнергич. лучком электронов продольных эл.-магн. волн в плазме. Одним из осн. направлений коллективных методов ускорения, основы к-рых были заложены работами советских учёных В. И. Векслера, Г. И. Будкера и Я. Б. Файнберга, является метод ускорения электронов и ионов волнами плотности заряда в плазме и некомпенсиров. лучках заряд. частиц, предложенный Я. Б. Файнбергом в 1956. В 1965 Е. К. Заойский и Я. Б. Файнберг предложили использовать электронные пучки и возбуждаемые ими эл.-магн. волны для пучкового и турбулентного *нагрева плазмы*. Идея турбулентного нагрева плазмы позволила Е. К. Заойскому в 1969 сформулировать осн. принципы инерциального электронного УТС. В 70-х гг. Д. Д. Рютовым был предложен нагрев плазмы релятивистскими пучками в *открытых ловушках*.

Параллельно возникли и развивались направления, связанные со слабоионизованной плазмой. Открытие плазменно-пучкового разряда (1961) послужило основой созданию новых источников плазмы, использующих энергию плотных электронных пучков для ионизации газа. Создаваемая в таких источниках плазма оказалась сильно неравновесной с большим числом возбуждённых ионов, атомов и молекул в метастабильных состояниях, иницирующих ряд новых типов плазмохим. реакций. Неравновесная плазма пучкового разряда является рабочим веществом в плазмохим. реакторах по разделению изотопов, в квантовых генераторах когерентного излучения — плазменных лазерах и мазерах и др.

**Коллективные взаимодействия.** Все направления П. э. базируются на коллективных взаимодействиях

потоков заряд. частиц с плазмой и возбуждении сильных эл.-магн. полей. В основе коллективного взаимодействия лежат элементарные процессы излучения и поглощения эл.-магн. излучения заряд. частицами: одночастичный и коллективный эффекты Черенкова, нормальный и аномальный эффекты Доплера, циклотронное и синхротронное излучение и поглощение, опудиторное излучение, параметрич. резонансное излучение, *переходное излучение*, томсоновское и комптоновское рассеяние, *Манделштама — Бриллюэна рассеяние* и др. Если в плазме преобладают группы частиц совершающей упорядоченное движение, то при достаточно большой их плотности имеет место коллективное излучение эл.-магн. волн: часть энергии упорядоченного движения переходит в энергию эл.-магн. излучения. Именно так происходит в плазменных усилителях и генераторах эл.-магн. волн. В свою очередь, в регулярных полях возбужденных в плазме вдоль сторонние заряд. частицы могут приобрести упорядоченную энергию (коллективное ускорение). В нерегулярных полях с относительно широким спектром плазменных волн заряд. частицы приобретают неупорядоченную энергию вследствие поглощения этих волн и происходит нагрев плазмы. Поскольку пучки заряд. частиц могут обладать весьма большой кинетич. энергией, то и нагрев плазмы может быть значительным, вплоть до термоядерных темп-р. Такое возможно, однако, только в случае силовизионизованной плазмы. В слабоионизованной плазме существ. часть энергии передается нейтральным атомам и молекулам, в результате чего происходит их разогрев, возбуждение, диссоциация и ионизация. Эти процессы, в свою очередь, инициируют новые тип разряда, плазменно-лучевой разряд, новые типы хим. реакций (плазменно-хим. реакции), а также определяют работу нового типа квантовых генераторов — плазменных лазеров и мазеров, основанных на переходах в ионных и молекулярных уровнях энергий.

**Отличия и достоинства П. э.** Подобно вакуумной и квантовой электронике П. э. основана на явлении индуцированного (вынужденного) излучения и поглощения эл.-магн. волн заряд. частицами в плазме. Но если вакуумная электроника рассматривает излучение потоков заряд. частиц, движущихся в электродинамич. структурах — металлч. либо диэлектрич. волноводах и резонаторах, то П. э. исследует излучение потоков заряд. частиц, движущихся в плазме, в плазменных волноводах и резонаторах (см. *Волновод плазменный*). Частота эл.-магн. излучения в вакуумной электронике определяется конечными геом. размерами волноводов и резонаторов, а в квантовой электронике — дискретностью энергетич. уровней излучателей (возбужденных атомов и молекул); поэтому генераторы когерентного эл.-магн. излучения в вакуумной и в квантовой электронике узкополосны, менять их частоту плавно практически невозможно. В плазменных приборах частота зависит не только от геом. размеров волноводов и резонаторов, но и от плотности плазмы, поэтому излучатели в П. э. многодольные; меняя плотность плазмы, можно менять частоты в широком интервале. В этом заключается одно из существ. отличий и преимуществ П. э. Так, напр., частота продольных ленгмюровских колебаний холодной изотропной плазмы (в системе ед. CGSE)  $\omega_p = (3 \cdot 10^8 n_p)^{1/2} \text{с}^{-1}$ , где  $n_p$  — плотность плазмы. При значениях реально используемой плотности плазмы в пределах  $(10^{10} - 10^{18}) \text{см}^{-3}$  можно возбуждать волны длиной  $\lambda \approx (10^2 - 10^8) \text{см}$ , что перекрывает всю полосу СВЧ от субмиллиметрового и до дециметрового диапазона. При наложении на плазму внеш. магн. поля диапазон частот собств. мод эл.-магн. колебаний плазмы расширяется.

Дисперсионное ур-ние, описывающее возбуждение волн моноэнергич. релятивистским электронным пучком в простейшем случае холодной изотропной плазмы, записывается в виде

$$1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - \frac{\omega_b^2}{(\omega - km)^2} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\omega_b = \sqrt{3 \cdot 10^8 n_b}$  — ленгмюровская частота электронов пучка (*beam*),  $n_b$  — плотность,  $m$  — скорость пучка,  $k$  — волновой вектор,  $\omega$  — комплексная частота, действит. часть  $k$ -рой представляет частоту возбужденных продольных колебаний поля, а мнимая часть — инкремент нарастания их амплитуды.

Если  $n_p \gg n_b$ , то, как следует из решения ур-ния (1), частота нарастающих во времени колебаний

$$\omega = km \left[ 1 + \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} \left( \frac{n_b}{2n_p} \right)^{1/3} \right], \quad (2)$$

причем  $km = \omega_p$ . Из соотношения (2) видно, что механизмом расщепки колебаний является эффект Черенкова — скорость пучка находится в резонансе фазовой скоростью волны, но несколько больше последней. Расщепка колебаний происходит с инкрементом, равным  $\text{Im} \omega$ , до тех пор, пока скорость пучка не уменьшится до скорости волны. Отсюда можно найти амплитуду насыщения поля волны:

$$E_{\text{макс}}^p = \left[ \alpha \left( \frac{n_b}{2n_p} \right)^{1/3} 38 \pi n_b \frac{m c^2}{2} \right]^{1/2}, \quad \alpha = 0,2 - 0,3. \quad (3)$$

Второе отличие П. э. от вакуумной состоит в том, что если в последней возбуждаются поверхности стоячие волны, либо осев. моды эл.-магн. колебаний диэлектрич. волноводов и резонаторов, то в П. э. происходит также эл. возбуждение высших обьёмных мод с  $\lambda$ , намного меньшей геом. размеров плазменных волноводов и резонаторов. Макс. достижимая напряжённость элтрич. поля в плазме  $E_{\text{макс}}^p = (4\pi n_p m c^2)^{1/2} (c - \text{скорость света})$  и при плотности плазмы  $n_p \approx (10^{14} - 10^{18}) \text{см}^{-3}$  составляет  $E_{\text{макс}}^p \approx 10^7 - 10^8 \text{В/см}$ . В таком поле весьма эффективно будут ускоряться заряд. частицы до больших энергий на относительно малых длинах (на длине  $\sim 100 \text{см}$  частицы могут ускоряться до  $\sim 10^8 \text{МэВ}$ ). Существенно и то, что при возбуждении высших мод обьёмных колебаний ослабляется возможность пробоя на стенках плазменных волноводов и резонаторов.

Осн. преимущество П. э. перед вакуумной — пропускать пучки с большими токами. В вакуумных системах токи пучков ограничены сверху пространственным зарядом. Напр., через вакуумный цилиндр, волновод радиуса  $R$  можно транспортировать трубчатый электронный пучок с током, не превышающим

$$I_0 \approx 17 \frac{(\gamma^2 \beta^2 - 1)^{3/2}}{\Delta r_0 + 2 \ln(R/r_0)} \text{ [кА]}. \quad (4)$$

Здесь  $\gamma = 1 + e/mc^2$  — релятивистский фактор,  $e$  — кинетич. энергия электрона,  $r_0$  — ср. радиус пучка толщиной  $\Delta r_0 \ll r_0$ .

При движении потоков заряд. частиц в плазме происходит компенсации обьёмного заряда и тока индуцированными в плазме полями и токами. Благодаря этому в плазменных системах возможно достижение больших токов, но и здесь существует верхний предел, определяемый устойчивостью пучка

$$I_{\text{п}} \approx \gamma^2 I_0. \quad (5)$$

Из (5) видно, что ток пучка с энергией 1 МэВ предельный плазменный ток  $I_{\text{п}}$  достигает 100 кА, а мощность пучка — 100 ГВт, что намного превышает предельные значения в вакуумных системах. При этом шумосенсор. по заряду пучка более однородны по сечению и поэтому более эффективно взаимодействуют с эл.-магн. волнами в плазме. В результате существенно повышается эффективность возбуждения эл.-магн. волн потоками заряд. частиц и достигаются значительно большие мощности излучения, чем в вакуумной электронике.

В 70-х гг. появились источники мощных высокоэнергетич. электронных и ионных пучков (энергия частиц

~1 МэВ, токи ~ $10^8$ – $10^9$  А). При длительности импульса ~ $10^{-7}$  с полная энергия в таких пучках  $>10^6$  Дж, что вполне достаточно для инициирования термоядерных вспышки в дейтерий-тритиевых мишенях миллиметрового диаметра. Инверсионный УТС с использованием интенсивных ионных пучков считается одним из наиболее перспективных и интенсивно развивается.

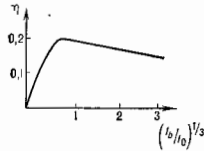
Релятивистская П. э. Мощные мегавольтовые электронные пучки открыли новые перспективы перед П. э., связанные с релятивизмом электронов. Развитием релятивистской П. э. обосновано теоретич. доказательство увеличения с ростом  $\gamma$  эффективности  $\eta$  плазменно-пучкового взаимодействия

$$\eta \sim (n_b/2n_p)^{1/2} \gamma, \quad (6)$$

несмотря на уменьшение линейного инкремента  $\text{Im}\omega \sim \gamma^{-1}$ . Эл.-магн. колебания и волны в плазме обладают самыми разнообразными фазовыми скоростями. В плазме существуют колебания, фазовая скорость к-рых намного меньше скорости света и даже тепловой скорости частиц; к их числу относятся ленгмювские колебания, непо-звуковые и альфеновские волны и др. Такие волны легко возбуждаются релятивистскими пучками заряд. частиц. Но, обладая малыми фазовыми скоростями, такие волны заперты в плазме, не излучаются, а со временем диссипируют, поглощаясь частицами плазмы. Именно поэтому возбуждение медленных волн в плазме релятивистскими пучками заряд. частиц служит эффективным каналом для пучкового нагрева плазмы.

С др. стороны, в плазме существуют и быстрые эл.-магн. волны, фазовая скорость к-рых  $\omega/k \approx c$  и  $\gg c$ . Особенно много таких эл.-магн. волн в плазме, находящейся в сильном внеш. магн. поле (см. *Волны в плазме*). Очевидно, что возбуждение быстрых волн в плазме возможно лишь интенсивными релятивистскими электронными пучками. Поэтому с появлением мощных источников релятивистских электронных пучков стала бурно развиваться релятивистская плазменная СВЧ-электроника.

Релятивистские скорости и большие токи изменяют характер взаимодействия сильноточных релятивистских электронных пучков с плазмой. Тот факт, что при  $\gamma^2 \gg 1$  даже значит. потери энергии электронов не нарушают условие черенковского резонанса, проявляются в увеличении кид генерации эл.-магн. излучения (6). Эта оценка справедлива, пока  $\eta \lesssim 0,1$ – $0,2$ . При больших токах пучка величина  $\eta$  удаётся определить только численно. В оптимальных условиях, когда геометрии пучка и плазмы совпадают, значения  $\eta$  весьма высоки и медленно спадают с ростом тока пучка (рис.).



При  $\mathcal{E} \approx 1$  МэВ и  $I_b = 2I_0 \approx 25$  кА (в пучке  $c \approx 0,15$  см при этом  $n_b \approx 5 \cdot 10^7$  см $^{-3}$ )  $\eta \approx 0,2$ , т. е. ок. 20% электрич. энергии пучка может перейти в энергию эл.-магн. излучения; мощность излучения составляет 5 ГВт. Поскольку фазовая скорость эл.-магн. волн при этом очень близка к скорости света, всё излучение практически без потерь будет выходить из плазмы (потери вследствие отражения от поверхности плазмы не превышают 2,5%).

Частота генерируемого излучения в случае  $\gamma^2 \gg 1$  дается ф-лой

$$\text{Re}\omega \approx \sqrt{\omega_p^2 - k_{\perp}^2} \gamma^2. \quad (7)$$

Здесь  $k_{\perp}$  — поперечное волновое число возбуждаемой пучком плазменной эл.-магн. волны. В случае возбуж-

дения аксиально-симметричных мод колебаний в плазме с тубчатой геометрией, совпадающей с геометрией пучка ( $r_0 = r_p$ ,  $\Delta = \Delta_p$ ), имеем

$$k_{\perp n}^2 = \begin{cases} \frac{1}{r_p \Delta} \ln(R/r_0), & n = 0; \\ \frac{2n}{r_p \Delta}, & n \neq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Из ф-л (7) и (8) следуют весьма важные выводы. При условии

$$k_{\perp}^2 \omega_p^2 > \omega^2 > k_{\perp}^2 \omega^2 \gamma^2 \quad (9)$$

в системе будет возбуждаться одна единственная ось. мода колебаний, частота к-рой растёт с увеличением плотности плазмы; т. е. частота, в отличие от вакуумной электроники, не жёстко связана с размерами резонатора, а может меняться в широком диапазоне. Для указанных выше параметров плазмы и пучка  $\omega_{\text{макс}} \approx 2 \cdot 5 \cdot 10^{11}$  с $^{-1}$  (что соответствует длине волны  $\lambda \approx 3$  мм) при  $n_{\text{макс}} \approx 5 \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$ . Поскольку фазовая скорость возбуждаемой волны близка к скорости света, поле волны сильно непотенциально, причём энергия поля составляет 20% от энергии пучка. А это означает, что напряжённость поля достигает величины  $E_{\text{макс}} = 3 \cdot 10^8$  В/см; такое поле может обеспечить ускорение заряд. частиц в плазме до энергии 300 МэВ на длине 100 см, что безусловно является ещё одним преимуществом сильноточной релятивистской П. э.

Такое высокоэфф. возбуждение эл.-магн. излучения, так же как и эфф. ускорение заряд. частиц волнами в плазме, возможно только в условиях одномодового возбуждения, т. е. в условиях (9). Если же плотность плазмы очень велика, так что выполняется неравенство  $\omega_p > k_{\perp} \omega \gamma^2$  для большого числа мод колебаний, то в плазме происходит возбуждение многомодового излучения, к-рое быстро поглощается электронами плазмы и приводит к их разогреву. Кнд преобразования энергии пучка в энергию многомодового излучения при этом остаётся незначит. (6), что позволяет дать оценку разогрева электронов плазмы сильноточным релятивистским электронным пучком:

$$T_e \approx \eta \frac{n_b}{n_p} m c^2 (\gamma - 1). \quad (10)$$

Для приведённых выше параметров пучка при  $n_p \approx 10^{18}$  см $^{-3}$  имеем  $T_e \approx 500$  эВ ( $5 \cdot 10^4$  К), что свидетельствует о возможности нагрева плазмы сильноточными пучками электронов до высоких термоядерных темп-р и инициирования термоядерных реакций.

Сильноточные релятивистские электронные пучки имеют ещё одно преимущество. Они могут инициировать плазменно-пучковый разряд и создавать плазму высокой плотности в разл. плазменных реакторах. Обладая большой энергией в целом, релятивистские электронные пучки способны обеспечить большой выход в одном импульсе и высокую ср. мощность при использовании пучков импульсно-периодич. режимов. А высокая энергия электронов обуславливает хорошую однородность плазменных реакторов даже при очень больших давлениях газа в них, намного превышающих атмосферное. Именно благодаря таким преимуществам на плазменно-пучковом разряде с использованием сильноточных релятивистских электронных пучков реализованы *линейные лазеры* на водородо-фтористых смесях, дающие когерентное излучение на длине волны  $\lambda \approx 3$  мкм с энергией до деск. кДж в импульсе длительностью  $t \leq 100$  нс и обладающие кнд по отношению к энерговкладу пучка в газ до 700%. Созданы экспериментальные плазменные лазеры на смесях  $\text{Ar} + \text{Fr} + \text{Kr}$  субмикронного диапазона для волн с энергией до 1 кДж в импульсе длительностью  $t \approx 40$  нс и кнд до 10%.

Релятивистская П. э., в особенности экспериментальная, сделала только первые шаги. Теория уже сформулировала ряд интересных физ. проблем, связанных с релятивизмом и сильноточностью пучков, к-рые требуют эксперим. исследования. Тем не менее много нерешённых проблем осталось и у теории, и в первую очередь исследования разл. механизмов взаимодействия электронных пучков с плазмой.

Лит.: 1) Файнберг Я. Б., Ускорение частиц в плазме, «Атомная энергия», 1959, т. 6, с. 431; 2) его же, Ускорение заряженных частиц в плазме, «УФН», 1967, т. 93, с. 617; 3) Вейсман И. А. и др., Плазменные и электронные ускорители и генераторы СВЧ, М., 1965; 4) Рабинович М. С., Рухадзе А. А., Принципы релятивистской СВЧ плазменной электроники, «Физика плазмы», 1976, т. 2, с. 715; 5) Вейсман И. А. и др., Рабинович И. М., Рухадзе А. А., Релятивистская сверхтонкая СВЧ плазменная электроника, «Изв. ВУЗов. Физика», 1979, т. 10, с. 47; 6) Файнберг Я. Б., Некоторые вопросы плазменной электроники, «Физика плазмы», 1977, т. 3, с. 152; 7) Вейсман И. А., Рабинович И. А., Рухадзе М. В., Рухадзе А. А., Плазменная СВЧ электроника, «УФН», 1981, т. 133, с. 3; 8) Кузедов М. В. и др., Релятивистская сверхтонкая плазменная СВЧ электроника: преобразование, доставка, нерезонансная СВЧ-плазма, «УФН», 1987, т. 13, с. 1370.

**ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВЫЙ РАЗРЯД** — один из видов электрического разряда в газе, в к-ром в межэлектродное пространство вводится ускоренный электронный пучок и плазма разряда разогревается кт. обр. за счёт плазменно-пучковой неустойчивости (см. *Пучковая неустойчивость*). В результате развития неустойчивости электронный пучок размазывается по скоростям с уменьшением ср. энергии электронов в пучке и передачей части первонач. энергии пучка ленгмювским колебаниям. Затем значит. часть энергии ленгмювских колебаний передаётся тепловым электронам плазмы. Разогрев тепловых электронов происходит за счёт затухания ленгмювских колебаний при электростатич. и электростатич. столкновениях, при рассеянии ленгмювских колебаний на тепловых электронах с трансформацией ленгмювских волн в ионно-звуковые, при затухании ленгмювских колебаний в области уменьшающейся концентрации плазмы и т. д.

Доля  $\alpha$  энергии пучка, трансформируемая в энергию ленгмювских колебаний, зависит от первонач. разброса скоростей электронов пучка  $\Delta v$  и от длины  $L$  взаимодействия пучка с плазмой. Наиб. значения  $\alpha$  ( $\alpha \sim 1$ ) реализуются для достаточно размытого пучка  $\Delta v/v_1 \approx (n_1/n_2)^{1/2}$  при  $L > (v_2/v_1)(n_1/n_2)A$ . Здесь  $v_1$  и  $v_2$  — скорость и концентрация электронов в пучке,  $v_2$  и  $n_2$  — средняя скорость и концентрация тепловых электронов,  $\omega_{pe} = \sqrt{4\pi e^2 n_2 / m_0}$  — ленгмювская частота,  $A$  — кулоновский логарифм.

В П.-п. р. значительный, а зачастую определяющий вклад в ионизацию вносят разогревые тепловые электроны плазмы, концентрация к-рых по мере развития разряда обычно начинает превышать концентрацию электронов в пучке. На формирование ф-ции распределения тепловых электронов оказывают влияние упругие и неупругие столкновения, а также ускорение электронов в электр. полях ленгмювских колебаний.

Диапазон токов  $i$  и напряжений  $u$  в П.-п. р. весьма широк:  $i \approx (0,1-10^4)$  А,  $u \approx (10-10^6)$  В. В основном П.-п. р. изучен в протяжённой геометрии. Часто в экспериментах для фокусировки пучка использовалось продольное магн. поле с напряжённостью  $H > 10^4$  Гаусс. Изучен также маломощный П.-п. р. в узком зазоре, возникающий приложении импульса напряжения на катодную сетку плазму *накованной дуги*, в к-рой длина свободного пробега электронов пучка больше разрядного промежутка. Пучок здесь формируется на катодной падении напряжения.

Для мощных импульсных П.-п. р. характерно возникновение обратного тока, к-рый создаётся образующимися в результате ионизации газа вторичными электронами. Последние ускоряются под действием индуцированного электр. поля, возникающего при импульсном увеличении тока разряда. В сильноточном импульс-

ном П.-п. р. обратный ток вносит существенный вклад в полный ток.

Лит.: Кингсеп С. С. и др., Механизм ионизации газа сильноточным пучком электронов, «ЖЭТФ», 1972, т. 63, с. 2132; Делёв П. М. и др., Теория плазменно-пучкового разряда, «Физика плазмы», 1976, т. 2, с. 407; Иванов А. А., Соболева Т. К., Юшманов П. Н., Перспективы использования плазменно-пучкового разряда в плазмотронике, «Физика плазмы», 1977, т. 3, с. 152; Бакшт Ф. Г. и др., Математическое моделирование процессов в ионно-тепловой плазменно-пучковом разряде, М., 1990.

Ф. Г. Бакшт, В. Г. Юрьев.

**ПЛАЗМЕННЫЕ ДВИГАТЕЛИ** — космич. реактивные (ракетные) двигатели с рабочим веществом в плазменной фазе, использующие для создания и ускорения потока плазмы электр. энергию. П. д. представляют собой соответствующим образом оптимизированные плазменные ускорители. П. д. — составная часть семейства *электроракетных двигателей* (ЭРД), в к-рое входят также ионные и эл.-нагревные двигатели. При эл.-магн. ускорении плазмы скорость истечения существенно превосходит тепловую скорость, характерную для хим. (тепловых) ракетных двигателей, что в соответствии с ф-лой Мецковского — Циолковского (см. *Механика тела переменной массы*) расширяет диапазон достижимых характеристик. Скоростей и увеличивает долю полезной нагрузки на космич. летат. корабле (КЛА). П. д. функционируют на борту КЛА в условиях невесомости либо отеч. малых гравит. полей. П. д. имеют малую тягу ( $10^2-10^4$  Н), работают длит. время ( $\geq 10^3$  ч) при большом числе включений. С учётом ограничений, возможностей совр. космич. энергетич. осн. критериями оптимизации П. д. являются весовые и габаритные характеристики электроракетных двигат. установок (ЭРДУ), ресурс их работы, энергетич. цена тяги  $u/2\eta$  ( $u$  — скорость истечения,  $\eta = Fu/2N$  — тяговый кпд, где  $F$  — тяга,  $N$  — потребляемая электр. мощность), уменьшающаяся при заданной скорости истечения по мере роста  $\eta$ .

Использование П. д. (ЭРД) даёт возможность прецизионно установить требуемые параметры орбиты КЛА, поддерживать их неизменными и осуществлять перевод КЛА с одной траектории на другую.

Интенсивная разработка П. д. началась в кон. 1950-х гг. В качестве прототипов П. д. рассматривались две схемы плазменных ускорителей. Однако до сих пор применяются только два типа П. д.: эрозийный импульсный П. д. (ИИП) и стационарный (неимпульсный) П. д. (СПД). В эрозийных ИИП электр. разряд развивается вдоль поверхности рабочего вещества (типа фторпласта, напр. тефлона), к-рое испаряется, частично ионизуется, и образовавшаяся плазма термич. ускоряется. С помощью таких П. д. создаются регулярные малые, точно дозированные импульсы тяги, недостающие при работе ракетных двигателей др. типов. Первый ИИП создан в СССР в 1930. В космич. условиях эрозийные ИИП впервые были успешно испытаны в 1964 на борту советской межпланетной космич. станции «Зонд-2». ЭРДУ с четырьмя эрозийными ИИП (рис.) функционировала с 1968 в течение более



чем 2 лет на борту американского спутника связи LES-8: 1 — брусок тефлона; 2 — катод; 3 — анод; 4 — струя плазмы; 5 — устройство для поджига разряда; 6 — буртики; 7 — конденсатор; 8 — пружина подачи.

вещства за разряд  $10^{-8}$  к. скорость истечения 3 км/с. Двигатель рассчитан на  $12 \cdot 10^6$  разрядов с импульсом  $2 \cdot 10^{-2}$  Н/с.

СПД — исторически сложившаяся, не очень удачное название двигателя, варианта плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяжённой зоной ускорения. Эти двигатели могут работать длит. время в пост. режиме. ЭРДУ с двумя СПД, работающими на ксеноне, каждый мощностью 400 Вт, скоростью истечения  $\sim 40$  км/с и тягой  $\sim 2 \cdot 10^{-2}$  Н впервые функционировала на борту советского ИСЗ «Метеор» в 1972. С её помощью за 170 ч работы высота орбиты ИСЗ изменилась на 17 км, и спутник был установлен на геосинхронную орбиту. В дальнейшем ЭРДУ с ксеноновыми СПД были включены в состав советских спутников серии «Метеор — природа», они регулярно выводятся в космос на борту спутников связи, в т. ч. ретрансляторов, для коррекции и поддержания параметров орбиты.

Лит.: Гильзман К. А., Электрические менистатетные корабли, 2 изд., М., 1970; Морозов А. И., Дубовик А. П., Космические электрореактивные двигатели, М., 1975; Тривини С. Д., Зиссман П. Б., Коэлов Н. П., Электрические ракетные двигатели, М., 1975; А. П. Шубин.

**ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ** — преобразователи тепловой энергии плазмы в электрич. энергию. Существуют два типа П. к. э. в — магнитогидродинамический генератор и термомеханический преобразователь.

**ПЛАЗМЕННЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ** — см. Неустойчивости плазмы.

**ПЛАЗМЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ** — класс плазмодинамич. устройств для получения потоков плазмы с энергией ионов от 10 эВ и выше. На нижнем пределе энергии П. у. соседствуют с генераторами низкотемпературной плазмы — плазмодиагностика, на верхнем — с коллективными ускорителями заряж. частиц (см. Коллективные методы ускорения частиц). В 80-е гг. на стационарных П. у. получены потоки с энергией частиц до  $10^4$  эВ, а на импульсных — до  $10^7$  эВ.

В отличие от ускорителей заряж. частиц, в канале П. у. находятся одновременно частицы с зарядами обоих знаков — положит. ионы и электроны, т. е. не нарушается квазинейтральность плазмы. Это снимает ограничения, связанные с пространственным зарядом (см. также Ленгмюра формула), и позволяет, напр., получать квазистационарные (т. е. длительностью  $10^{-2}$ — $10^{-6}$  с) плазменные потоки с эфф. током ионов порядка мА. А при энергии частиц  $\approx 100$  эВ.

Плазменные потоки с большими скоростями можно получить разными способами, напр. воздействием лазерного излучения на твердое тело. Однако доведены до определённого уровня совершенства и получили широкое распространение те П. у., в к-рых ускорение и создание плазмы осуществляются за счёт электрч. энергии с помощью электрч. разряда (рис. 1).

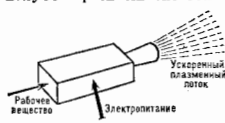


Рис. 1. Принципиальная схема плазменного ускорителя.

**Механизм ускорения.** При анализе рабочего процесса в П. у. плазму можно рассматривать и как сплошную среду, и как совокупность частиц (ионов и электронов). В рамках первого подхода ускорение плазмы обусловлено перепадом полного (ионного и электронного) давления  $p = p_i + p_e$  и действием силы Ампера  $F_A$  (см. Ампера закон), возникающей при взаимодействии токов, текущих в плазме с магн. полем  $F_A \sim [jB]$ , где  $j$  — плотность тока в плазме,  $B$  — индукция магн. поля.

В рамках второго подхода ускорение ионов объясняется: 1) действием электрч. поля  $E$ , существующего в плазменном объеме; 2) столкновениями направленного потока электронов («электронного ветра») с иона-

ми; 3) столкновениями ионов с ионами, благодаря к-рым энергия хаотич. движения ионов переходит в энергию направленного движения (тепловое или газодинамич. ускорение ионов). Наиб. значение для П. у. имеет электрч. ускорение ионов, меньшее — два последних механизма.

Создание электрч. поля в плазме, обладающей подвижными электронами, представляет, вообще говоря, сложную задачу. Из Ома обобщенного закона

$$j/\sigma = \frac{V_{th}}{en} + E + \frac{1}{c}[v \times H]$$

видно, что для существования электрч. поля в плазме нужно иметь либо большое сопротивление, либо большие градиенты  $P_e$  (реально — большую электронную температуру), либо магн. поле и дрейф электронов. Для П. у. важны два последних механизма.

**Классификация П. у.** Они делятся на тепловые и электромагнитные в зависимости от того, преобладает ли в процессе ускорения перепад полного давления  $p$  или сила Ампера.

Среди тепловых П. у. осв. интерес представляют и в э т е р м и ч. у с к о р и т е л и, в к-рых  $p_e > p_i$ . Конструктивно стационарный неизотермич. П. у. представляет собой «магн. солло», в к-ром либо путём инжекции быстрых электронов, либо путём электронного циклотронного резонанса создают плазму с горячими электронами ( $T_e \approx 10^7$ — $10^8$  К или в эВ, единица:  $kT_e \approx 10^2$ — $10^3$  эВ). Электроны, стремясь покинуть камеру, создают объёмные заряды (без нарушения кваинейтральности!), электрч. поле к-рых «вытягивает» (ускоряет) ионы, сообщая им энергию порядка  $kT_e$ .

Наряду со стационарными создан ряд вариантов импульсных неизотермич. П. у. Их разработка связана с использованием как релятивистских электронных пучков, так и энергетик, созданной первоначально для их возбуждения. Примером П. у. последнего типа могут служить т. н. рефлексные триоды.

Эл.-магн. П. у. подразделяются по характеру подвода энергии к плазме на три класса: р а д и а ц и о н н ы е у с к о р и т е л и, в к-рых ускорение плазменного потока происходит за счёт давления эл.-магн. волны, падающей на плазменный ступок (рис. 2,а); и н д у к ц и о н н ы е у с к о р и т е л и — импульсные системы, в к-рых внеш. нарастающее магн. поле  $B$  индуцирует ток в плазменном кольце (рис. 2,б). Взаимодействие этого тока с радиальной составляющей внешнего магн. поля

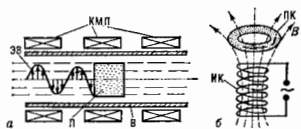


Рис. 2. Электромагнитные плазменные ускорители: а — схема радиационного плазменного ускорителя (ИМП — катушка магнитного поля; В — волновое; П — плазменный ступок; ЭМВ — электромагнитная волна); б — схема индукционного плазменного ускорителя (В — индукция магнитного поля; ИК — индукционная катушка).

создаёт силу Ампера, к-рая и ускоряет плазменное кольцо; э л е к т р о д и е П. у., в к-рых существует непосредств. контакт ускоримой плазмы с электродами, подключёнными к источнику напряжения. Наиб. изученными и многочисленными являются электродные П. у., к-рые ниже рассмотрим подробно.

**П. у. с собственным магнитным полем.** И м п у л ь с н ы е э л е к т р о д и е П. у. (пушки). Первым П. у. был «рельсотрон», питаемый конденсаторной батареей. Плазменный ступок создаётся либо за счёт эрозии диэлектрич. вставки под действием скользящего разряда, либо при пропускании большого тока через тонкую проволоку, натянутую между массивными

электродами — рельсами Р (рис. 3,а), к-рая при этом испаряется и ионизуется, либо за счёт ионизации газа, вырскиваемого в межэлектродный промежуток через щель, клапан. При разряде на ток в плазменной перемычке П (достигающий десятков и сотен кА) действует собств. магн. поле электр. контура, в результате чего за время  $\sim 1$  мкс и происходит ускорение сгустка. В нач. 60-х гг. появились им-

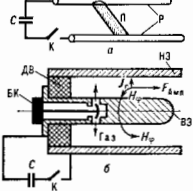


Рис. 3. Плазменные ускорители с собственным магнитным полем: а — схема рельсотрона; б — схема коаксиального импульсного плазменного ускорителя. Быстродействующий клапан БК подает газ в зазор между внутренним (ВЗ) и наружным (НЗ) электродами.

пульсные коаксиальные ускорители. Эти ускорители обычно работают на газе (рис. 3,б), хотя достаточно часто используются «воздушные» П. у., в к-рых рабочим веществом служат продукты эрозии диэлектрик. вставки ДВ, либо пары электродов. Импульсные П. у., работающие на водороде, позволяют получать потоки со скоростями  $\sim 10^8$  см/с (10 кэВ/частицу) с общим энергосодержанием, приближающимся к мегаджоулю ( $\sim 10^{12}$  частиц/импульс).

Стационные и импульсные сильноточные П. у. В принципе коаксиальные П. у. можно сделать стационарными (работающими в непрерывном режиме), если поддерживать напряжение и непрерывно подавать между электродами рабочее вещество. Для оптимизации процесса в случае работы на газе канал надо делать переменной ширины (рис. 4,а). Если анод сделать сплошным, то при пост. подаче рабочего вещества и непрерывном увеличении разрядного тока  $I_p$  скорость истечения плазмы и кнд ускорителя сначала будут расти (уменьшаться уд. вес затрат на ионизацию, нагрев плазмы и потери на стенки). Однако при нек-ром значении  $I_p$  происходит вынос большой части разрядного тока за среэ ускорителя, напряжение резко возрастает, падает кд, в ускорителе возникает колебания. Наступает т. п. критич. режим. Его физ. причиной является в конечном счёте обеднение ионами прианодной области, к-рое происходит под действием объёмного электр. поля. Такой критич. режим наиб. эффективно устраняют подачей части рабочего вещества через анод (переход в режим «ионного токопереноса»), для чего используют не сплошной, а пористый или стержневой анод. Наиб. часто такая схема применяется в квазистационарных П. у., работающих при мощностях  $\sim 10^8$  Вт с длительностью импульса  $\sim 1$  мс.

В стационарных коаксиальных П. у. большой нагрузке подвергается не только анод, но и катод, где превалируют тепловые нагрузки вследствие гибели ионов. В области умеренных мощностей ( $N \leq 10^4$  кВт) проблема катода решается переходом на «торцевую» схему с коротким катодом, через к-рый одновременно подается рабочее вещество.

На нормально работающих торцевых П. у. с собств. магн. полем при разрядных токах ок.  $10^4$  А удаётся получить стационарные потоки плазмы со скоростями 50 км/с. Торцевой плазменный ускоритель становится неработоспособным не только при больших, но и при малых разрядных токах  $I_p$ . Поскольку сила Ампера (за счёт к-рой происходит ускорение в П. у.) пропорц.  $I_p^2$ , при  $I_p < 1000$  А она в реальных условиях становится меньше, чем газокинетич. давление, и торцевой П. у. превращается в обычный плазмотрон. Чтобы увеличить эффективность торцевого П. у. при малых мощностях, в рабочем канале создают внеш. магн. поле (рис. 4,б). Полунаходящийся П. у. наз. торцевым холодковским или магнитоплазменным ускорителем. Он позволяет получать потоки плазмы

со скоростями в десятки км/с при мощности  $\geq 10$  кВт. Замечат. особенность торцевых П. у. — способность создавать потоки частиц с энергией, в неск. раз превосходящей приложённую разность потенциалов. Это объясняется увеличением ионов электронным потоком, идущим из катода (электронным ветром).

Наряду с «внешней» подачей рабочего вещества через катод, значит. распространение в установках для плазменной технологии получи-

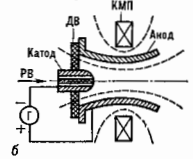
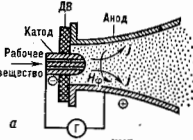


Рис. 4. Стационарные сильноточные плазменные ускорители: а — схема торцевого плазменного ускорителя (ДВ — диэлектрич. вставка); б — схема торцевого магнитоплазменного ускорителя (ДВ — диэлектрическая вставка; КМП — катушка магнитного поля; РВ — рабочее вещество).

ли торцевые магнитоплазменные ускорители с эрозией (за счёт катодных пятен) охлаждаемых катодов.

Квазистационарный сильноточный П. у. Переход в область мощностей  $> 10^7$  Вт и скоростей истечения  $\geq 10^7$  см/с требует не только использования ионного токопереноса, но и защиты катода от тепловых перегрузок. В этих условиях можно применить длинный катод и для пропускания тока использовать его боковую поверхность, как это сделано в коаксиальном импульсном П. у. (рис. 3,б). Однако теперь для обеспечения стационарности течения зазор между электродами должен иметь переменную ширину, сужение, как солло Ланана. Это теснение подчиняется ур-нию Бернулли:

$$\frac{\rho^2}{2} + i(\rho) + \frac{H^2}{4\rho} = \text{const.}$$

Здесь  $i(\rho)$  — потенциал. Из ф-лы следует, что макс. скорость плазмы на выходе из такого П. у.

$$v_{\text{макс}} = \sqrt{2(c_{\text{аод}}^2/(\gamma-1) + v_{\text{аод}}^2 + v_0^2)} \approx \sqrt{2}v_{\text{аод}}$$

(звачком «а» отмечены значения параметров на входе в канал,  $v_{\text{аод}}$  — скорость звука,  $v_{\text{аод}}$  — альевновская скорость,  $\gamma$  — показатель адиабаты).

П. у. с внешним магнитным полем. Если требуется получать стационарные потоки малой мощности ( $\geq 10^8$  Вт) или потоки частиц с большими скоростями ( $\geq 10^8$  см/с), особенно удобными оказываются т. и. П. у. с замкнутой дрейфой — один из видов к-рых изображён схематически на рис. 5. Если между анодом и катодом приложить разность потенциалов, то электроны начнут дрейфовать перпендикулярно электр. Е и магн. Н полям, описывая кривые, близкие к циклоиде. Длина ускорительного канала L выбирается так, чтобы высота электронной циклоиды

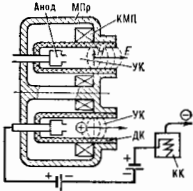


Рис. 5. Схема плазменного ускорителя с замкнутой дрейфой. Магнитное поле создает магнитронное МПР и катушка КМП; ДК — диакотрическая камера.   
 ди  $h_2$  была много меньше L ( $L \gg h_2$ ). В этом случае говорят, что электроны «замкнуты». Высота ионной циклоиды  $h_1$  в силу большой массы ( $M_1$ ) нова в  $m_1/m_2$  раз превосходит  $h_2$  ( $m_2$  — масса электрона). Поэтому если сделать длину канала L много меньше  $h_1$ , то ионы будут



слабо отклоняться магн. полем и под действием электрич. поля будут ускоряться практически по прямой линии. Энергия, передаваемая ионами в таком ускорителе, близка к разности потенциалов, приложенной между анодом и катодом, умноженной на заряд иона, а разрядный ток близок к току ускоренных ионов. В целом описываемый П. у. работает след. образом. Ускоренный газ поступает через анод в кольцевой ускорительный канал УК (рис. 5). Здесь в облаке дрейфующих электронов нейтральные атомы ионизируются. Возникший при ионизации электрон за счёт столкновений и под влиянием колебаний диффундирует на анод, а после ускоренный электрич. полем  $E$ , покидает канал. После выхода из канала ион (чтобы не нарушалась квазинейтральность) получает электрон от катода-компенсатора КК. Существует ряд модификаций П. у. с замкнутым дрейфом (с анодным слоем, олигоионовые, многоионовые и т. п.). Эти ускорители в стационаре позволяют получать плазменные потоки с эфф. током ионов от единиц до сотен А с энергией от 100 эВ до 10 кВ и более. П. у. с анодным слоем представляют собой системы, в к-рых для ускорения ионов используются слои толщиной порядка электронного ларморовского радиуса, подобно тем, к-рые обеспечивают магн. изоляцию.

Существуют не только стационарные, но и импульсные П. у. с анодным слоем. Примером могут служить «магнитозерлов», диоды, с помощью к-рых получают ионные токи до 1 МА с энергией 1 МэВ. Длительность импульса таких систем составляет обычно доли мкс.

**Применение П. у.** Первые П. у. (рельсотроны) появились в сер. 1950-х гг. С тех пор эти системы непрерывно изучаются и совершенствуются. Они нашли применение как плазменные двигатели (см. также *Электро-ракетные двигатели*), в технологии для очистки поверхностей (методом катодного распыления), нанесения металл. плёнок на разл. поверхности, в исследованиях по ионосферной аэродинамике, в термодерных исследованиях (в качестве инжекторов плазмы), плазмоджиги, в лазерной технике, для активных экспериментов в космосе и т. д.

**Лит.**: Плазменные ускорители, М., 1973; Физика и применение плазменных ускорителей, под ред. А. И. Морозова, Минск, 1974; Р и ш и н С. Д., Д е с е н о в Ш. В., К о з л о в Н. П., Плазменные ускорители, М., 1983; Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы, т. 5, М., 1984; Плазменные ускорители и ионные инжекторы, под ред. П. П. Козлова, А. И. Морозова, М., 1984.

**ПЛАЗМЕННЫЙ ГЕНЕРАТОР** — 1) генератор высоко-температурной плазмы, то же, что *плазмотрон*. 2) П. г. СВ Ч - и з л у ч е н и я — источник эл.-магн. излучения, возникающего при взаимодействии релятивистского пучка электронов с плазмой. Подробнее см. в ст. *Плазменная электроника*.

**ПЛАЗМЕННЫЙ КАТОД** (в общем случае — плазменный электрод) — область разряда вблизи собственно катода, в к-рой плазма создается при помощи спец. средств, не связанных с осн. разрядом. Способов образования П. к. существует несколько. К их числу можно отнести варьир. конструкций на катоде с образованием плазменного факела в вакуумном диоде [4], *скользящий разряд* вдоль поверхности диэлектрика [5, 2], дополнит. *дуговой разряд* с дуговым инертного газа для защиты электродов от коррозии в МГД-генераторах [3] и т. п. Осн. назначение П. к. — обеспечить управление плотностью тока на катоде независимо от величины тока осн. разряда.

**Лит.**: 1) М е с а ц Г. А., Генерирование мощных наносекундных импульсов, М., 1974; 2) Газовые лазеры, под ред. И. Ман-Даниеля и У. Нигона, пер. с англ., М., 1986; 3) Магнитогидродинамические генераторы открытого цикла, под ред. Дж. Хейвуда и Г. Вуэма, пер. с англ., М., 1972.

**ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС** — стационарный грубо-контурный высокотемпературной деитериевой плазмы, являющийся локальным источником нейтронов и жестких излучений; так же называют и электроразрядную установку, в к-рой получается эта плазма. П. ф. относится к разряду шнечки (см. *Шнечка-эффект*); образуется

в области кумуляции токовой оболочки на осн. газоразрядной камере спец. конструкции, вследствие чего, в отличие от з-шнечки, приобретает нецилиндрическую (обычно воровкообразную) форму. Благодаря этому удаётся резко повысить плотность энергии в плазме (эффект фокусировки) и стимулировать ряд процессов, приводящих к генерации мощных импульсов жестких излучений [1]. В 90-е гг. термодерный кид П. ф. достигает 0,1% от энергии, запасённой в источнике питания (в пересчёте на деитерий-тригтневую смесь), мощность нейтронного излучения  $\sim 10^{21}$  Дж/с, жесткого и мягкого рентг. излучения  $\sim 10^{10}$  Дж/с соответственно. Малые размеры излучающей области (0,01—3 см), отност. компактность и дешевизна конструкции делают этот источник одним из наиб. перспективных.

П. ф. был открыт Н. В. Филипповым в 1954 [2] в процессе изучения з-пнечки в плоской металл. камере (рис. 4, слева), а затем аналогичные явления наблюдались Дж. Мейзером в 1961 [3] в коаксиальных плазменных инжекторах (рис. 4, справа). Как видно из рис., установка, с помощью к-рой наблюдается П. ф., состоит из источника импульсного питания 1 (обычно малоиндуктивная конденсаторная батарея), ключа 2 (обычно разрядник высокого давления) и разрядной камеры, корпус к-рой 3 является катодом; от него изолятор 4 отделяет внутр. электрод 5 — анод. После откачки воздуха камера заполняется рабочим газом —

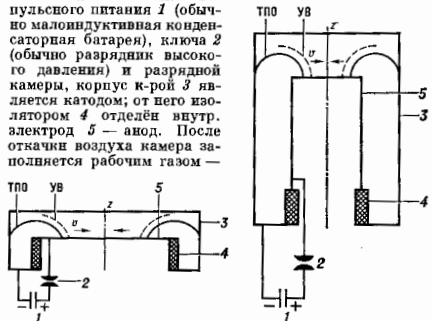


Рис. 4. Схема плазменного фокуса: слева — с плоскими электродами; справа — с цилиндрическими электродами. УВ — ударная волна; ТПО — токово-плазменная оболочка.

деитерием, водородом, деитерий-тригтневой смесью (часто с добавками благородных газов) при давлении 0,5—10 мм рт. ст. либо чистыми благородными газами при давлении  $10^{-2}$ — $10^{-1}$  мм рт. ст. Далее через газ осуществляется разряд мощной конденсаторной батареи — проводится серия т. н. тренировочных пусков установки с целью очистки камеры от посторонних примесей (удаления воздуха на электродах и изолятора); насыщения анода рабочим газом для поддержания ионной составляющей тока; напыления металла, плёнки на изолятор для повышения его элктрич. прочности; напыления на анод металла. плёнки вперемежку с атомами газа для облегчения элктрич. разряда на его поверхности при переходе в т. н. рентг. режим (см. ниже). Во время этих пусков выход жестких излучений не наблюдается. С ростом числа пусков появляются жесткие излучения и каждая установка проходит три стадии, сменяющие друг друга через неск. сотен пусков: 1) режим с одним сжатием; 2) режим с двумя сжатиями; 3) рентг. режим. Физ. процессы, происходящие в зоне П. ф., сложны и многообразны, наиб. характерны для него сгребание плазмы, образовавшейся ударной волной, сжатие плазмы в центре анода, обрыв тока.

**Режим с одним сжатием.** В этом режиме после подачи напряжения на анод ( $\sim 20$ —40 кВ) происходит пробой рабочего газа по поверхности изолятора, на к-рой по

мере нарастания разрядного тока формируется токово-пламенная оболочка (ТПО), имеющая волокустую структуру. Затем эта оболочка отрывается от изолятора, волокна её смыкаются и, ускорясь до скоростей  $\sim(2-3) \cdot 10^7$  см/с и толкая перед собой ударную волну, она сбегает газ (плазму) к центру камеры. При этом форма оболочки становится воронкообразной, что приводит к частичному вытеканию плазмы вдоль оси. В результате выброса массы на ограниченном по высоте участке пинча удаётся резко повысить степень сжатия по радиусу, что увеличивает концентрацию энергии в единице объема плазмы. При плоском сжатии плотность повышается примерно в 4 раза, в цилиндр. камере с учётом отражения ударной волны — в 33 раза, а при вытекании вещества вдоль оси плотность повышается в  $10^3$  раз (с учётом снижения энтропии). Размеры камеры и индуктивности внеш. цепи выбирают такими, чтобы момент макс. сжатия плазмы вблизи оси  $z$  совпал с моментом макс. значения тока. При этом ТПО так сжимается, что отношение её нач. радиуса к конечному достигает величины  $10^3$ . В момент макс. сжатия излучается небольшой импульс нейтронного и рентг. излучений. Темп-ра плазмы при этом равна  $\sim 5 \cdot 10^8$  К (0,5 кэВ). Нек-рое время ( $\sim 10^{-7}$  с) удерживается прямой пинч (рис. 2, а), а затем на его поверхности начинает развиваться неустойчивость Рэлея — Тейлора.

Однако обычно в режиме с одним сжатием раньше образования неустойчивости происходит обрыв тока, сопровождающийся резким увеличением напряжения на пинче (в  $10-100$  раз) вследствие быстрого увеличения аномального сопротивления плазмы в области сжикилоса за счёт микротурбулентности. Разорвавшаяся часть пинча становится плазменным диодом, на к-ром происхо-



Рис. 2. Обсупрограмма пинча в плазменном фокусе: а — в режиме с одним сжатием; б — в режиме с двумя сжатиями.

дит ускорение электронов к аноду и ионов к катоду до энергий  $\sim 10^6-10^8$  эВ. Когда происходит обрыв тока, то скорость электронов достигает  $\sim 10^9$  см/с, вместо электр. тока через пинч идёт ускоренный поток электронов, к-рый самофокусируется внутри плазмы пинча. В фокальной зоне вблизи анода он испытывает аномальное поглощение, порождая мощную ударную волну, к-рая, проходя через пинч, нагревает его до темп-ры  $\sim(2-3) \cdot 10^8$  К ( $2-3$  кэВ) и даёт мощную вспышку нейтронного излучения.

Режим с двумя сжатиями. По мере утолщения напылённой на анод плёнки металла с насыщенным в ней газом установкой автоматически переходит в режим с двумя сжатиями. Последовательность процессов та же, однако обрыв тока происходит позже, когда неустойчивость Рэлея — Тейлора уже успела развиться. При этом в цилиндр. камерах часто второе сжатие наблюдается в виде неск. перетяжек, тогда как в камере с плоскими электродами на заключит. стадии может образоваться снова прямой пинч той же высоты, но меньшего диаметра и большей плотности (рис. 2, б). Заключит. стадия П. ф. в этом режиме полностью идентична соответствующему процессу режима с одним сжатием. В этом режиме наблюдаются две начальные сравнительно малоинтенсивные вспышки нейтронного и рентг. излучений, а в осн. вспышке их интенсивность возрастает в неск. раз вследствие достижения более вы-

соких плотностей тока, магн. поля и плазмы. Проникновение магн. поля в плазму начинается вблизи анода, где напылённая на его поверхность за предыдущие разряды плёнка оказывается легкораспыляемой.

В рентгеновском режиме элетрич. «впрыск» поверхности проводника происходит до момента схождения ТПО к оси. Этот режим приходит на смену предыдущему, когда толщина напылённого на анод металла, насыщенного рабочим газом, достигает десятков мкм. Контракция тока к осн П. ф. при этом происходит с более высокими скоростями (до  $10^8$  см/с). Рабочий газ в основном «отжимается» от анода, так что в кошке пинчевания вблизи центра этого электрода формируется короткий ( $< 1$  см) пинч малого диаметра ( $\sim 1$  мм) с плазмой высокой плотности ( $\sim(3-5) \cdot 10^{19}$  см $^{-3}$ ). В этом плазменном ступке снова образуется плазменный диод (разрыв на пинче), напряжение на к-ром после резкого подъёма ( $< 10^{-8}$  с) до величин ок. 0,5 МэВ медленно ( $> 10^{-7}$  с) снижается. При этом мощный электронный поток, замещающий во втором режиме ток проводимости, сам замедляется и замещается через нек-рое время ионовым потоком. Часть ионов этого потока, имеющих ср. энергии  $\sim 20-200$  кэВ, оказывается захваченной соств. магн. полями П. ф. (токовыми круговыми и сжатым продольным). Весьма высокая концентрация токов и полей, достигаемая в этом режиме, приводит к генерации мощных потоков заряд. частиц, а удержание ионов ср. энергии в соств. полях является причиной генерации высокоинтенсивного нейтронного излучения.

Именнее энергии питания П. ф. в диапазоне  $10^3-1$  МДж меняет его выходные параметры. Выход нейтронов растёт с увеличением энергии как квадрат энергозапаса или четвертая степень тока. При этом спектр нейтронного излучения не меняется; электронная темп-ра и плотность плазмы практически не зависят от энергозапаса; однако с увеличением разрядного тока примерно линейно растёт энергосодержание пучков заряд. частиц и время удержания плазмы и замедленных ионов, тогда как объём плазмы увеличивается квадратично с ростом тока.

Увеличения плотности и темп-ры плазмы можно достичь с помощью радиац. охлаждения, если ввести в плазму П. ф. примеси веществ с большим зарядом ядра в виде нач. добавок к рабочему газу или лазерным впрыскиванием в центр. часть. На этой основе создаются проекты осуществления в П. ф. т. н. радиац. коллапса, при к-ром планируется достичь термоядерных темп-р и плотностей плазмы, превышающих плотность твёрдого тела [4].

Дальнейшее увеличение плотности и темп-ры плазмы, энергосодержания пучков заряд. частиц и повышение нейтронного и рентг. выхода связываются также (помимо увеличения энергозапаса) с профилированием тока во времени и пространстве, с замедленным  $\alpha$ -стадии, с лазерным инципированием разряда и комбинац. пучково-лазерным воздействием на плазму П. ф., а также с созданием на основе П. ф. гибридного реактора синтеза — деление [5].

Установки с П. ф. могут использоваться в плазменных исследованиях как источники нейтронов и жёстких излучений для решения ряда научно-техн. задач: материаловедческих и блаветных испытаний для управляемого термоядерного синтеза; импульсного актив. анализа короткоживущих изотопов; нейтронной терапии; накачки лазерных сред; изучения высокоинтенсивных ионов; взаимодействия мощных пучков с плазмой и т. д.

Лит.: 1) Бурцев В. А., Грибков В. А., Фил иппов Т. И., Высокотемпературные низичные образования, в кн. Итоги науки и техники, Сер. Физика плазмы, т. 2, М., 1981; 2) Петров В. Д. П. и др., Мощный импульсный газонный разряд в камерах с продольными стенками, в сб. Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций, т. 4, М., 1958; 3) Mather J. W., Formation of the high-density deuterium plasma focus, «Phys. Fluids», 1965, v. 8, p. 366; 4) Senger J., Contraction of z-pinchs actuated by radiation losses,

там же, 1976, в. 19, п. 1426; G R i b k o v V., Feasibility study for developing hybrid reactor, based on the DPF — device, «Atomkernenergie, Kerntechnik», 1980, Bd 36, № 3, p. 167. В. А. Грыбков.

**ПЛАЗМОН** — квант плазменных колебаний. В плазме твёрдого тела термин «П.» и «плазменное колебание» часто используют как синонимы, в отличие от газовой плазмы (см. Волны в плазме). Флуктуации плотности заряда создают электрич. поле, к-рое вызывает ток, стремящийся восстановить электронейтральность; из-за инерции носители заряда «проскакивают» положение равновесия, что и приводит к коллективным колебаниям. Энергия П. связана с частотой  $\omega$  плазменных колебаний соотношением  $\hbar\omega = \hbar\omega_0$ . Спектр колебаний зависит от зонной структуры твёрдого тела, наличия границ магн. поля и др.

**ПЛАЗМООПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ** — корпускулярно-оптич. системы, в к-рых для фокусировки (целенаправленного изменения фазового объёма потока заряд. частиц) используются электрич. и (или) магн. поля, созданные с помощью квазинейтральной или заряд. плазмы. П. с. очень многообразны, поскольку практически все плазменные образования содержат электрич. или магн. поля, к-рые так или иначе могут быть использованы для фокусировки пучков. В отличие от *электронной и ионной оптики*, рассматривающей фокусировку пучков заряд. частиц внешними электрич. и магн. полями в вакууме, фокусировку пучка электрич. и магн. полями плазма изучает в л а з м о н и т и к а. В наст. время (90-е гг.) плазмооптика находится в стадии формирования, но проблема динамики проходящих через плазменные конфигурации пучков заряд. частиц привлекает внимание как с точки зрения диагностики этих конфигураций, так и для собственно фокусировки пучков при спец. выборе конфигураций и связанных с ними полей. Использование электрич. и магн. полей плазмы приводит к двум особенностям, привлекающим для исследователей. 1) В классич. корпускулярной электронной и ионной оптике электрич. и магн. поля лапласовы, т. е. потенциалы  $\Phi_{эл}$  и  $\Phi_{маг}$  удовлетворяют ур-нию Лапласа

$$\Delta\Phi = 0. \quad (1)$$

Следствием этого является, напр., неустраиваемость сферич. aberrаций и квадратичная зависимость фокусного расстояния  $F$  от напряжения для осесимметричных линз (см. *Электронные линзы*). В П. с. могут быть реализованы нелапласовы электрич. и магн. поля, для к-рых зависимость  $F$  от напряжения линейна и сферич. aberrации устраняем. 2) В большинстве П. с. объёмный заряд фокусируемого пучка компенсируется электронами, поэтому он не ограничивает нормальную работу устройств в очень широких пределах.

**Ставоание плазмооптики.** Классич. корпускулярная оптика берёт своё начало от работ Х. Буша (H. Busch, 1926), к-рый описал и исследовал лапласовы электростатич. и магн. линзы для электронных пучков малой плотности.

Первыми корпускулярно-оптич. системами, к-рые уже отличались от исходных лапласовых систем, были источники сильноточных электронных пучков. В работах И. Ленгмюра (I. Langmuir), К. Д. Чайлда (C. D. Child), Дж. Пирса (J. R. Pierce) были подробно разработаны основы оптики пучков заряд. с объёмным зарядом и установлен закон «3/2» (Чайлда — Ленгмюра), в к-ром в корпускулярную оптику был введён «плазменный» масштаб — дебаевский радиус (см. *Ленгмюра формула*). Имено такого порядка оказалось расстояние между электродами в диоде Ленгмюра. В 1947 О. Шертнер (O. Scherzer) впервые предпринял попытки использовать объёмный заряд пучка для ослабления сферич. aberrаций.

В работах Г. В. Спивана с сотрудниками (1946—49) обнаруживается и систематически исследуется фокусировка магн. линзой направл. потока электронов, эмитированных катодом ртутной дуги. Эти работы

были первой успешной демонстрацией фокусировки погружённого в плазму пучка частиц и по сути были предтечей целого ряда последующих разработок, в т. ч. по транспортровке релятивистских электронных пучков (РЭП) и мощных ионных пучков в остаточном газе.

В 40-х гг. был разработан промышленный эл.-магн. способ разделения изотопов урана (см. *Изотопное разделение*). Для этой цели нужно было иметь сильноточные ионные пучки с достаточно высокими оптич. характеристиками (малым фазовым объёмом). В качестве фокусирующей системы использовалось квазидвородное поперечное магн. поле. В таком сепараторе объёмный заряд быстрых ионов практически компенсирован холодными электронами, возникающими при столкновении ионов с атомами остаточного газа. Образующиеся при этом медленные ионы выталкиваются несоблюдением положит. зарядом пучка на стенки камеры. Т. о., здесь реализуется также и газовая фокусировка, для к-рой требуется некое оптимальное давление в камере.

В 1945—47 Д. Габором [1] была сформулирована идея и сделана попытка реализации т. н. линзы с объёмным зарядом (рис. 1). В объём квазидвородного магн. поля

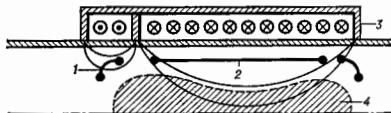


Рис. 1. Схема линзы с объёмным зарядом: 1 — горячий катод; 2 — анод; 3 — магнитопровод; 4 — электронное облако.

вырываются электроны из катода. Для предотвращения ухода электронов из рабочей области магн. поле имеет пробы (см. *Открытые ловушки*). Поскольку напряжённость магн. поля относительно мала и выбирается только для удержания электронов, фокусировка ионов в линзе Габора осуществляется объёмным зарядом электронов, плотность к-рых предполагалась много больше плотности ионов ( $n_e \gg n_i$ ). Если плотность электронов постоянная в объёме линзы, а этого специально добивались, то напряжённость электрич. поля  $E_r$  со  $r$  и линза не должна создавать aberrаций (если можно пренебречь конечными эффектами). Электроны плазмы за счёт своей большой подвижности и подверженности неустойчивостям имеют тенденцию выравнивать потенциал вдоль магн. силовых линий произвольной конфигурации (свойство «эквипотенциализации» магн. силовых линий, см. [2]). Это свойство не зависит от того, является система квазинейтральной ( $n_i \approx n_e$ ) или нет. Если электронная температура  $T_e \rightarrow 0$ , условия эквипотенциализации можно записать в виде

$$\Phi(x) = \Phi(\gamma), \quad (2)$$

где  $\gamma$  — «номер» магн. силовой линии. Варьируя конфигурацию магн. силовых линий, можно создавать произвольный потенциальный рельеф в системе, т. к. каждый силовой линии магн. поля превращается в своеобразный «прозрачный электрод», на к-рый можно подать свой потенциал (подробнее см. ниже). Этим был указан путь к построению множества П. с., к-рые включают в себя как частный случай схему Габора и в то же время естественно примыкают к классич. корпускулярной оптике.

Системы, основанные не на ур-нии Лапласа (1), а на уравнении (2), наз. собственно П. с. Наряду с ними продолжается поиск новых типов П. с. Среди них следует отметить  $\lambda$ -пучки, в к-рых протосева зона используется для фокусировки и транспортровки РЭП и сильноточных ионных пучков. Развиваются и л а з м о н и м а н ч. системы, в к-рых осуществляется фоку-

справка и сепарация не внешних «прострельных» частиц, а частиц самого плазменного объёма. К ним относятся магнитнолазерные компрессоры, плазменные центрифуги и др., но они уже не являются П. с.

Электростатические поля в плазме. Условие (2), обеспечивающее эквипотенциальность магн. силовых линий, наглядно выводится из ур-ния движения электронного компонента плазмы (в гидродинамич. приближении, см. *Двуэлектронная гидродинамика плазмы*):

$$m_e e \frac{dv_e}{dt} = -\nabla p_e - en_e e \left( E + \frac{1}{c} [v_e H] \right) + \frac{en_e n_{i0}}{v_{ie}} (v_i - v_e), \quad (3)$$

$$E = -\nabla \Phi.$$

Здесь  $v_{ie}$  — время ускорения электрон-ионных столкновений,  $\mu = m_i m_e / (m_i + m_e) \approx m_e$  — приведённая масса,  $m_i$ ,  $m_e$  — массы ионов и электронов.

Если электроны плазмы достаточно хорошо удерживаются в П. с., то их скорости, как правило, малы и в (3) можно пренебречь инерциальным членом (слева). Если к тому же невелика плотность тока ( $j \lesssim 10$  А/см<sup>2</sup>), то мал и диссипативный член в (3). В результате при  $T_e = \text{const}$  получаем фундаментальное для собственно П. с. ур-ние

$$-\nabla \left( \Phi - kT_e \ln \frac{n_e}{n_0} \right) = \frac{1}{c} [v_e H]. \quad (4)$$

Здесь  $n_0$  — произвольная постоянная. Отсюда, в частности, следует, что вдоль магн. силовых линий ( $\gamma = \text{const}$ ) сохраняется т. н. термализованный потенциал

$$\Phi_\gamma(\gamma) = \Phi(x) - \frac{kT_e \ln(n_e(x))}{n_0}, \quad (5)$$

к-рый представляет собой прологарифмиров. распределение Больцмана с учётом того, что каждая магн. трубка имеет свой характерный потенциал.

Из (5) при  $T_e \rightarrow 0$  следует  $\Phi_\gamma(\gamma) \rightarrow \Phi(x)$ , т. е. условие эквипотенциальности магн. силовых линий (2). Системы, в к-рых роль члена  $kT_e \ln(n_e/n_0)$  в ур-нии (4) мала, иногда наз. лоренцевыми системами. Системы, в к-рых  $\nabla \Phi \sim \sqrt{kT_e} e^{-1} \ln(n_e/n_0)$ , наз. неизоэнтальпическими. Система Д. Габора относится к лоренцевым системам. Неизоэнтальп. П. с. пока практически не разработаны и т. о. «собственно П. с.» — это лоренцевы системы. Фиксация потенциала магн. силовых линий [точнее  $\Phi_\gamma(\gamma)$ ] может осуществляться либо «внешним» образом с помощью системы достаточно большого числа ввеш. электродов, способных к электронной эмиссии, к-рые пересекают магн. силовые линии, либо «внутренним» — за счёт объёмной и пристенокочной проводимости. В большинстве «собственно П. с.» магн. поле можно считать заданным. Если к тому же задан термализов. потенциал  $\Phi_\gamma(\gamma)$ , а  $T_e$  бесконечно мало, то расчёт П. с. сводится к расчёту траектории ионов:

$$M_i \frac{dv_i}{dt} = e \left( E + \frac{1}{c} [v_i H] \right)$$

в заданных ввеш. полях. Если  $T_e$  конечна, расчёт «собственно П. с.» сводится к решению системы двух ур-ний: ур-ния Пуассона

$$\Delta \Phi = 4\pi e n_0 \exp \left[ \frac{\Phi - \Phi_\gamma(\gamma)/kT_e}{n_0} \right] - n_i$$

и ур-ния Власова для  $\psi$ -функции распределения ионов  $f_i$ , т. к.  $n_i = \int f_i dv$ . В реальных условиях эта задача, как правило, решается методом последоват. приближений.

Из ур-ния (4) следует постоянство термализов. потенциала не только вдоль магн. силовых линий, но и вдоль линий дрейфа электронов. Отсюда вытекает условие «автономности» плазменной конфигурации: чтобы при фиксации потенциалов магн. трубок с помощью электродов не происходил ионный обмен электронами между электродами и плазменным объёмом П. с., необходимо в изоэнтальп. случае ( $T_e = \text{const}$ ) постоянст-

во  $\Phi_\gamma(\gamma)$  на магн. поверхностях с постоянной «нагруженность»  $w$ :

$$\Phi_\gamma(\gamma) = f(w),$$

где

$$w = \int n dl \cdot H.$$

Здесь  $dl$  — элемент дуги магн. силовой линии, вдоль к-рой ведётся интегрирование. Простейший способ реализации «автономных» П. с. — использование осесимметричных конфигураций с полюсными электродами и магн. полями.

В ряде случаев, напр. при создании плазменных ускорителей и рекуператоров («торнотелителей») ионных пучков, удобно использовать магнитноэлектрич. слой толщиной порядка электронного ларморовского радиуса. Такие слои хорошо известны и как основа «магнитной изоляции». Очевидно, они войдут в изложенную выше схему, если сохранить в (3) инерциальный член.

П. с. с эквипотенциальными магнитными силовыми линиями. Используя явление эквипотенциальности магн. силовых линий с тем или иным способом фиксации  $\Phi_\gamma(\gamma)$ , можно создать самые разн. плазменные конфигурации, применимые при решении не только задач плазмооптики, но и др. задач, в т. ч. проблемы УТС. На рис. 2 приведены схемы основных типов таких устройств. Здесь штриховыми линиями изображены магн. силовые линии, а прямыми линиями и ним сплошными — линии равных потенциалов. Схемы даны для случая  $T_e = 0$ , когда  $\Phi = \Phi_\gamma(\gamma)$ . На рис. 2 (а) представлена

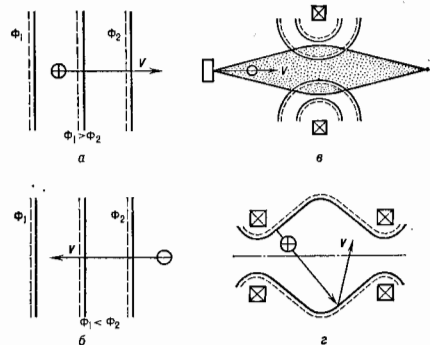


Рис. 2. Магнитноэлектрические плазменные устройства: а — ускорители компримированных ионных пучков (КИП); б — рекуператоры энергии КИП; в — плазменная линза для фокусировки КИП; г — магнитноэлектрические плазменные ловушки; штриховые линии — магнитные силовые линии; сплошные линии — эквипотенциалы.

схема полей в ускорителе ионов; последние в облаке электронов, формирующих элетрич. поле и компенсирующих в той или иной степени объёмный заряд ускоряемых ионов, движутся от более высокого потенциала  $\Phi_1$  в область меньшего потенциала  $\Phi_2$ . При этом магн. поле слабое и служит в основном для замедливания электронов и слабо влияет на динамику ионов. Эта схема реализована в ряде *плазменных ускорителей*, в т. ч. в стационарных плазменных электроореактивных двигателях. На рис. 2 (б) представлена схема полей в рекуператоре, в к-ром поток первоначально энергичных ионов тормозится, отдавая энергию в элетрич. цепь. Собственно фокусирующие системы — в виде схемы «плазменной линзы» — представлены на рис. 2 (в). Эта схема

характерна не только для фокусирующих и дефокусирующих систем, но и для энерго-массанализаторов разл. мощностей, систем транспортников ионов и др. На рис. 2 (а) изображена схема магнитоэлектрич. ловушки, в к-рой электроны удерживаются магнитным, а ионы — преимущественно электрич. полем. Все указанные схемы в тех или иных модификациях изучаются экспериментально.

**Плазменные линзы.** Среди собственно П. с. получили распространение (не считая плазменных ускорителей) осесимметричные «плазменные линзы» (рис. 2, а). Наб. высокие оптич. характеристики этих линз (минимум aberrаций) были получены в двух режимах: в квазидебавеском («габоровском») и в режиме с внешним разрядом.

В квазидебавеском режиме диаметр отверстия линзы  $d$  выбирается меньше дебаевского радиуса экранирования для ионов  $r_{D1} = \sqrt{\epsilon_0/4\pi n_1 e^2}$ , во много больше дебаевского радиуса экранирования для электронов  $r_{De} \ll d \lesssim r_{D1}$ .

$$r_{De} \ll d \lesssim r_{D1} \quad (6)$$

Оск. достоинством квазидебавеского режима является его устойчивость, что позволяет работать с нематрирующими электродами. Этот режим устойчив при плотностях тока ионов до неск. десятков мА/см<sup>2</sup>. При плотностях, существенно выше определяемых условием (6), в таких линзах обычно развиваются конвективные неустойчивости.

Режим с внешним разрядом также может быть реализован в геометрии, близкой к схеме Габор (рис. 1), но по концам цилиндрич. промежутка располагаются два электрода, между к-рыми в продольном магн. поле зажигается *Пеннинга разряд*, к-рый тщательным подбором параметров делают малоучастным. Если в квазидебавеском режиме в плазменном объеме находятся (в идеале) только фокусируемые ионы, то во втором случае фокусируемые ионы находятся в разрядном плазме и составляют малую часть общего числа ионов.

Экспериментально плазменная линза в квазидебавеском режиме с электронами, образующимися за счёт вторичной ионно-электронной эмиссии, впервые была подробно изучена в работе [3] на установке (рис. 3),

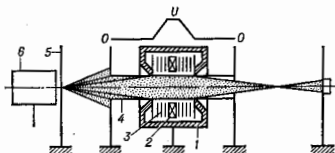


Рис. 3. Схема экспериментальной плазменной линзы для фокусирования ионного пучка: 1 — магнитонитовод; 2 — катушка магнитного поля; 3 — электроды-фиксаторы; 4 — цилиндр — источник вторичных электронов; 5 — диафрагма; 6 — ионный источник.

на к-рой исследовалась фокусировка ионов с энергией до 10 кэВ и током до 10 мА. Напряжённость магн. поля была ~100–200 Э. На рис. 4 даны схемы распределения магн. силовых линий (штрих) и эквипотенциалов. Было показано, что в отличие от лапласовой электростатич. линзы, у к-рой фокусные расстояния  $F_{л1} \sim (\epsilon_0/4\pi e U_{\text{фок}})^2$ , в плазменной линзе в соответствии с теорией  $F_{л1} \sim \epsilon_0/4\pi U_{\text{фок}}$ . Плазменной линзой удалось сфокусировать квазинейтральный пучок ионов; причём линзу можно было делать как собирающей, так и рассеивающей, а фокусное расстояние  $F_{л1}$  при  $\epsilon_0/U_{\text{фок}} \gg 1$  было существенно меньше  $F_{л1}$ . Более того, подавая на электроды соответствующее распределение потенциалов, можно

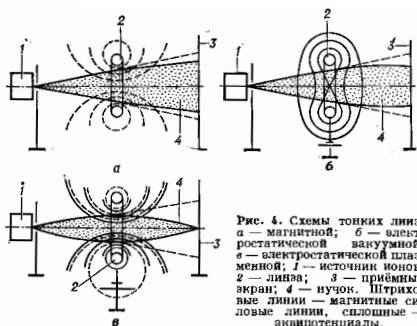


Рис. 4. Схемы тонких линз: а — магнитной; б — электростатической; в — электростатической плазменной; 1 — источник ионов; 2 — линза; 3 — прицельный экран; 4 — пучок. Штриховые линии — магнитные силовые линии, сплошные — эквипотенциалы.

было так подобрать  $\Phi_r(r)$ , чтобы устроить сферич. aberrацию.

Интенсивные исследования и разработки плазменных (габоровских) линз начались за рубежом в сер. 70-х гг. Особенно эффективными такие линзы оказались для фокусировки тяжёлых ионов с энергией ~1 МэВ, для к-рых ранее использовались громоздкие кварцопольные линзы. Были созданы плазменные линзы уникальных параметров [5], к-рые могли фокусировать пучок ионов с энергией 4 МэВ в фокальное пятно размером ~10 мкм.

Лит.: 1) Gabov D., A space-charge lens for the focusing of ion beams, «Nature», 1947, v. 60, p. 89; 2) Морозов А. И., Фокусировка холодных квазинейтральных пучков в электромагнитных полях, «ДАН СССР», 1965, т. 163, № 6, с. 1363; 3) Жуков В. В., Морозов А. И., Шелкин Г. Я., Экспериментальные исследования плазменной фокусировки ионных пучков, в кн.: Физика и применение плазменных ускорителей, Минск, 1974; 4) Морозов А. И., Лебедев С. В., Плазменная линза, в сб.: Вопросы теории плазмы, в. 8, М., 1974; 5) Lefevre H. W. и др., Can an electron plasma lens produce submicrometer size focal spots of Me V ions, «Nucl. Inst. and Meth. Phys. Research», 1985, v. B 10/11, pt 2, p. 707.

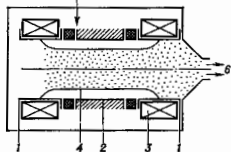
**ПЛАЗМОТРОН** — устройство для создания ионной (с давлением порядка атмосферного) или *нанотемпературной плазмы* (с  $T$  до  $10^4$  К) с помощью *электрических разрядов в газе* и дающего плазменный поток, используемый для исследовательских и научных целей. Плазму газовых разрядов получают давно, уже более 100 лет, однако разработки спец. устройств начались в 10-х гг. 20 в., а сам термин «П.» возник примерно в 50-х гг., тогда же началось широкое практич. использование П.

Принцип работы П. заключается в следующем. Холодный газ непрерывным потоком продувают через область, где горит стационарный разряд; газ нагревается, ионизируется, превращается в плазму, к-рая вытекает из области разряда в виде плазменной струи чаще всего прямо в атмосферу (тогда и давление в плазме атмосферное). На практике обычно применяются П., работающие на *дуговом разряде*, *Пеннинга разряде*, ВЧ- и СВЧ-разрядах. Импульсные источники плазмы, работающие, напр., на искровом разряде, к П. не относятся. Кроме ионизации газа в электрич. разряде значительно реже используется ионизация газа электронным пучком. Принципиально можно нагревать и ионизировать газ мощным лазерным излучением для создания оптич. П. Для науч. исследований и технол. целей используют П., работающие на разл. газах (воздух, аргон, азот, водород и др.), а также на газах с присадками паров или капель твёрдых веществ (напр., для плазменного нанесения покрытий). Мощность П. различна: от десятков Вт до десятков МВт, давление газа — от долей мм рт. ст. до десятков и сотен атмосфер.

Дуговой П. может работать на постоянном или переменном токе. Широко используемый дуговой П. пост.

тока состоит из разрядной камеры, в к-рой расположены электроды вдоль по оси или коаксиально, и ула подachi плазмобразующего вещества. Плазма может истекать из разрядной камеры П. в виде струи или создавать плазменную дугу. Во втором случае разряд горит между катодом и обрабатываемым телом, служащим анодом. В П., изображённом на рис. 1, электроды, выполненные в виде отрезков труб круглого сечения, расположены вдоль оси; вокруг них устанавливаются обмотки

Рис. 1. Схема дугового плазмотрона постоянного тока: 1 — электроды; 2 — микселектронная вставка; 3 — соленоиды; 4 — зона электрической дуги; 5 — подача рабочего тела; 6 — истечение плазмы.



соленоидов, создающие магн. поле, перпендикулярное плоскости электродов. В результате взаимодействия тока дуги с магн. полем место привязки дуги к электродной стенке перемещается по окружности, что предохраняет электроды от перегрева и распыления, а также стабилизирует положение места привязки в осевом направлении (магн. стабилизация и теплоизоляция). Межэлектродная вставка из изоляц. материала ограничивает диам. дуги и тем самым позволяет повысить её темп-ру по сравнению с темп-рой электр. дуги в свободном пространстве.

Газ, образующий плазму, часто вводится во внутр. канал межэлектродной вставки (иногда с закруткой); газный вихрь обдувает столб дуги и плазменную струю; под действием центробежных сил слой холодного газа располагается у стенок камеры, предохраняя их от нагревания дугой (газоохлаждение, стабилизация и теплоизоляция). Если сильною сжатия потока плазмы не требуется, то стабилизирующий поток не закручивают, а направляют параллельно столбу дуги. Применяют также стабилизацию и термоизоляцию дуги потоком воды.

В тех случаях, когда необходимо ввести в дугу материал эрозии электрода (напр., для плазменного нанесения защитного покрытия), один из электродов П. устанавливается в торце камеры. При этом предусматривается его осевая подача по мере выгорания. Наиб. мощность получена в П. с коаксиальными электродами. В них ток дуги протекает в радиальном направлении по относительно малому (по поперечному сечению) токовому каналу. Дуга движется по окружности электродов под влиянием взаимодействия тока с создаваемым соленоидом магн. полем. Этому полю придаётся такая форма, чтобы стабилизировать положение дуги в осевом направлении.

Дуговой П. трёхфазного переменного тока представляет собой фактически три П., подобных П. на рис. 1, у к-рых дуги от разл. электродов соединены по схеме «звезда». В ряде случаев для обеспечения устойчивой работы такого П. (отсутствие погасания дуги при прохождении тока через нуль на к.-л. электроде) применяются постоянно действующие системы СВЧ или искрового поджига. Мощности дуговых П.  $\sim 10^4$ — $10^7$  Вт, темп-ра струи на срезе сопла 3000—2000 К, скорость истечения струи 1— $10^4$  м/с, промышленный кид 50—90%.

Для создания неравновесной плазмы низкого давления (доли мм рт. ст.), служащей источником заряж. частиц, чаще всего используется П. с разрядом Пеннинга, при к-ром электроны колеблются в осевом направлении, что способствует эфф. ионизации.

Безэлектродные П. Энергия эл.-магн. поля (низкой частоты  $10^4$ — $10^8$  Гц) может быть введена в плазму раз-

ряда индукц. безэлектродным способом. На этом принципе разрабатываются трансформаторы П. Наиб. распространение получили индукционные П. в ВЧ- и СВЧ-П., в к-рых рабочей плазмобразующей газ нагревается вихревыми токами (частоты  $10^4$ — $10^7$  Гц). ВЧ-П. (рис. 2) содержит эл.-магн. катушку,

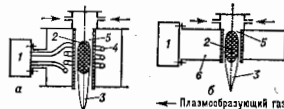


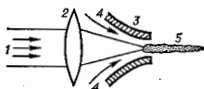
Рис. 2. Схемы ВЧ-плазмотрона: а — индукционный; б — сверхвысокочастотный; 1 — источник эл.питания; 2 — разряд; 3 — плазменная струя; 4 — индуктор; 5 — разрядная камера; 6 — волновод.

индуктор, разрядную камеру, узел ввода плазмобразующего вещества. Т. к. ВЧ-индукционный П. является безэлектродным, то эти П. используют, если к плазменной струе предъявляются высокие требования по чистоте, напр. для получения тонкодисперсных и особо чистых порошковых материалов. Мощность такого П. достигает  $10^8$  Вт, темп-ра  $\sim 10^4$  К, скорость истечения плазменной струи до  $10^3$  м/с, промышленный кид  $\sim 50$ —80%.

П. с ионизацией газа электронным лучом не получили широкого распространения в связи с большой сложностью необходимого оборудования. Установка с таким П. содержит сложные системы преобразования переменного пост. напряжения питания в высокое, вакуумные системы, электронную пушку, систему ввода луча в зону повышенного давления, камеру нагрева и ионизации газа, а также системы управления, защиты и коммутации. Несмотря на сложность, П. с электронным лучом используются для нек-рых спец. целей в связи с наличием у них ряда принципиальных преимуществ по сравнению с П. с электр. разрядом: возможность генерации неравновесной («холодной») плазмы с наименьшей энергией, «одевой» иона, отсутствие загрязнения плазмы материалами эрозии электродов, возможность применения разл. рабочих тел и получения высоких темп-р с умеренными тепловыми нагрузками на стенки и др.

Оптический П. Возможность непрерывного поддержания разряда и генерации плотной низкотемпературной плазмы излучением лазера непрерывного действия на  $\text{CO}_2$ , т. е. возможность создания оптич. П., была теоретически обоснована Ю. П. Райзером в 1970. Если продувать газ через горящий в фокусе луча оптич. разряд, то можно получить непрерывную плазменную струю, как и в П. др. разрядов. Пока имеются лишь эксперим. результаты, напр. был получен непрерывный оптич. разряд в струе аргона атм. давления, истекающий через сопло (рис. 3). Лазерный луч мощностью  $\sim 1$  кВт фокусировался в области сопла соосно с направлением

Рис. 3. Принципиальная схема оптичного плазмотрона: 1 — лазерный луч; 2 — линза; 3 — сопло; 4 — поток газа; 5 — плазменная струя.



потока, и из сопла вытекала плазменная «игла» радиусом  $\sim 1$  мм, длиной  $\sim 3$  см и с темп-рой  $\sim 45000$  К. Оптич. П. имеет ряд преимуществ перед П. др. типов: не требует к.-л. конструктивных элементов для подвода эл.-магн. энергии к плазме (электродов, индукторов, волноводов); темп-ра плазмы значительно выше 15000—20000 К; большая возможность выбора места разряда, приближения к определяемому телу, обрабатываемым плазменной струей. Для практич. осуществления оптич. П. необходимо создать мощный лазер не-

прерывного действия и лучше не в видимом, а в ИК-диапазоне, т. к. коэф. поглощения в плазме довольно быстро уменьшается с частотой.

**Применение П.** Плазмотроны широко используются в плазмохимии и плазменной металлургии. В нагретых до высоких темп-р веществах газов могут интенсивно протекать хим. реакции, не происходящие или очень медленно протекающие в др. условиях. Это уже практически используется для целого ряда производств. С помощью П. осуществляются спец. технол. процессы, такие как плазменное нанесение покрытий, плазменная резка, сварка и др. (см. *Плазменная технология*). П. является генератором плазмы для век-рых научных исследований и модельных тепловых испытаний МГД-генераторов, исследований теплообмена и испытаний средств теплозащиты для условий входа космич. аппаратов в атмосферу и др. П. служит для создания плазменных источников света, в т. ч. эталонных источников высокотемпературного излучения. С помощью П. исследуются свойства низкотемпературной плазмы, создаётся неравновесная плазма низкого давления для электростр. приборов и устройств; в частности, П. является источником заряд. частиц для ускорителей.

*Лит.:* Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Уриков В. А., Электронные нагреватели газа (плазмотроны), М., 1973; Жуков М. Ф., Коротков А. С., Уриков В. А., Прикладная динамика термической плазмы, Новосибир., 1975; Райзер Ю. П., Основы современной физики газоразрядных процессов, М., 1980. В. М. Неделко.

**ПЛАЗМОХИМИЯ** — наука, изучающая закономерности физ.-хим. процессов и реакций в низкотемпературной плазме. Низкотемпературная плазма представляет собой совокупность заряд. частиц (электронов, ионов), возбуждённых по внутр. степеням свободы (электронным, колебательным, вращательным), тяжёлых частиц, свободных радикалов; обычно она также содержит высокотемпературные и высокоионизационные газовые потоки (струи) большого динамич. напора и является источником мощного эл.-магн. излучения. В такой плазме распределение реагирующих частиц по скоростям и внутр. степеням свободы отличается от распределения Максвелла — Больцмана, т. е. система является неравновесной и плазмохим. процессы и реакции существенно отличаются от реакций традиц. химии. В реагирующей плазмохим. системе ср. энергия молекул реагентов и их продуктов составляет от 0,1 до 50 эВ; при этом роль неупругих соударений (и в частности, реактивных) резко возрастает. Характерные времена физ., хим. и физ.-хим. процессов сближаются, так что эти процессы уже нельзя считать независимыми; поэтому необходимо рассматривать многоканальные процессы, учитывая взаимодействие каналов между собой и влияние внеш. среды на реагирующую подсистему. Кроме обычных для газов столкновений молекул (атомов и т. п.), в плазме имеют место взаимодействия на больших расстояниях, вызванные эл.-магн. полями и взаимодействием заряд. частиц между собой и с нейтральными частицами. Энергия внутр. степеней свободы частиц плазмы и поступает, энергия, как правило, сильно отличается друг от друга по величине: разл. компоненты плазмохим. системы могут иметь разл. энергию (или темп-ру при наличии почти максвелловского распределения). Так, в глущем разряде, ВЧ- и СВЧ-разрядах при низких давлениях ср. энергия электронов  $\sim 3\text{--}10$  эВ, ср. колект. энергия молекул и радикалов  $\leq 1$  эВ, а ср. энергия поступает, и вращат. степеней свободы молекул  $\sim 0,1$  эВ.

Неравновесность плазмохим. процессов может быть обусловлена не только разл. физ. воздействиями (потоками частиц или излучением), но и самой хим. реакцией (особенно быстрой), к-рая, будучи пороговым процессом, уменьшает кол-во молекул, обладающих энергией, превышающей пороговую, изменяя тем самым вид ф-ции распределения молекул по энергиям.

**Кинетика плазмохимических реакций.** Для её описания применяется неравновесная хим. кинетика, к-рая

учитывает квантовую энергетич. структуру молекул и атомов, т. е. концентрацию каждого компонента в каждом энергетич. состоянии и их ф-ции распределения, а также переходы между энергетич. состояниями и каналами хим. реакций. Система ур-ний традиционной хим. кинетики при этом заменяется на систему *Паули уравнений*, описывающих многоканальные процессы, причём каждое отдельное ур-ние этой системы связывает скорость изменения концентрации реагирующих молекул (атомов, ионов, радикалов) данного вида в век-ром  $i$ -м энергетич. состоянии с концентрациями этих молекул во всех возможных энергетич. состояниях, с вероятностями перехода между состояниями, с частотой столкновения частиц и со скоростью возбуждения данного уровня («накачкой» уровня).

Ур-ние Паули может быть получено или на основе общих положений теории вероятности и теории случайных процессов, или на основе *Льюиса уравнения*. В простейшем случае для мономолекулярной реакции в термостате инертного газа он имеет вид

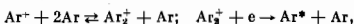
$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \sum_j N(p_{ij} - p_{ji})N_j(t) - k_i N_i(t) + R_i(t),$$

где  $N_i$  — концентрация реагирующих молекул в  $i$ -м энергетич. состоянии в момент времени  $t$ ;  $p_{ij}$  — вероятность (на одно столкновение) перехода при столкновении реагирующей частицы с молекулой термостата из состояния  $j$  в состояние  $i$ ;  $p_{ji}$  — то же для перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$ ;  $k_i$  — коэф. скорости хим. реакции для молекул, находящихся в  $i$ -м состоянии;  $R_i$  — скорость возбуждения  $i$ -го уровня («накачка»);  $\nu$  — частота столкновений. Интегрирование на ЭВМ системы ур-ний Паули позволяет в ряде случаев получить полное описание плазмохим. реакций в конкретной реагирующей системе. В общем случае надо решать сложную систему, состоящую из *Ньюе — Стокса уравнений* (или их аналогов), ур-ний Паули и ур-ний электродинамики. Кроме ур-ний Паули для концентраций отд. типов частиц в неравновесной кинетике используются также ур-ния Больцмана для ф-ции распределения и ур-ние Лапласа, включающее стохастич. силу. Коэф. скорости плазмохим. реакции  $k_i$  является ср. скоростью (на единицу концентрации реагирующих компонент) по всем динамически и энергетически доступным каналам столкновений. Усреднение производится по скоростям и квантовым состояниям реагирующих молекул, т. е. в выражение  $k_i$  должны входить в явном виде ф-ции распределения  $f_i(r, \vec{r}, t)$  реагентов и продуктов реакций. В простейшем случае диссоциация двухатомной молекулы, являющейся малой добавкой в инертном газовом термостате, при учёте только колебат. степеней свободы имеем для  $i$ -го колебат. уровня:

$$k_i = \int_{\sigma_{\text{пор}}}^{\infty} \sigma_i(\epsilon) \sqrt{\epsilon} f_i(\epsilon) d\epsilon,$$

где  $\sigma_i$  — сечение реакции,  $\epsilon$  — энергия,  $f_i(\epsilon)$  — ф-ция распределения. Это выражение для  $k_i$  наз. ур-нием коэф. скорости хим. реакции. Существует роль в плазмохим. реакциях играет процесс сменения реагентов разл. энергий и реакций в турбулентных потоках. Скорости плазмохим. реакций очень велики (длительность контакта реагентов порядка  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  с).

**Механизмы плазмохимических реакций** зависят от состава плазмы, длины свободного пробега реагирующих частиц, давления плазмы, распределения молекул по электронным, колебат. и вращат. уровням энергии. Наиболее важные и часто встречающиеся плазмохим. процессы, при к-рых идёт хим. реакция, следующие: ионизация, возбуждение электронных, колебат. и вращат. уровней, диссоциация, рекомбинация. В плазме атомарных газов часто образуются кластеры и *кластерные ионы*, напр. в плазме Ar происходят реакции:



где  $Ag^*$  — возбуждённый атом. В плазме молекулярных газов происходит диссоциация молекул при электронном ударе, при столкновениях с более тяжёлыми частицами, в т. ч. находящимися в метастабильном состоянии; при этом могут диссоциировать молекулы, находящиеся не только в основном, но и в возбуждённом состоянии. В плазме молекул с большим *срождением к электрону* может происходить диссоциативное прилипание электрона с образованием отрицат. иона, напр.  $HCl + e \rightarrow Cl^- + H$ . Возможны также рекомбинация тяжёлых частиц в молекулы, диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов с электронами и т. д. В плазме смеси газов осн. вклад в диссоциацию вносит передача энергии электронного возбуждения и перезарядка. Так, в плазме тлеющего разряда в смеси  $O_2$  и  $CO$  происходит реакция:  $O_2 + CO^* \rightarrow CO + 2O$ . В существенно неравновесной плазме (напр., при пониженном давлении) осн. роль играют реакции однократного электронного удара и реакции возбуждённых молекул и атомов, находящихся в метастабильных состояниях. В плазменных процессах, происходящих в ограниченном пространстве (реакторах), существенную роль играют процессы взаимодействия частиц плазмы с частицами поверхности стенок (гетерофазные реакции, адсорбция, диффузия, тепло- и массоперенос). Осуществление реакции соединения в плазме  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $Cl_2$ ,  $F_2$ ,  $SiH_4$ ,  $CF_4$  и т. д. с углеводородами, полупроводниками, диэлектриками с образованием оксидов, нитридов, карбидов, боридов и т. д.

Плазмохимическая технология. В промышленных масштабах квазиравновесные и неравновесные плазменные процессы реализуют в тех случаях, когда в результате получают чистые и высокочистые материалы, когда соединения обладают необычной структурой или уникальными свойствами, когда достигается высокий выход продуктов реакции. В плазменных процессах можно использовать широкодоступное и малочистое сырьё (напр., воздух), а также трудно перерабатываемое обычным способом сырьё или отходы разл. производств.

Технол. схема плазмохим. процесса кроме операций, присущих любому хим. процессу (подготовки сырья, сохранения, выделения и очистки целевого продукта), содержит стадии генерации плазмы, плазмохим. превращения и анаклаи. В генераторе плазмы происходит преобразование теплоносителя или реагента в пламенное состояние. Обычно в качестве генератора плазмы используется *плазмотрон*, применяющие также ударные трубки и мощные лазеры. В смысле плазмохим. реактора образуется смесь плазмообразующего газа с остальными реагентами, обладающими задаваемыми параметрами, определяемыми термодинамикой и кинетикой процесса. При этом начинается хим. реакция, зависящая от организации смешения компонентов и продолжающаяся непосредственно в реакторе. Если необходимо, реакцию прекращают не непосредственно в реакторе, преобразуя реакцию на требуемой стадии реаким снижением тем-ры в закалочном устройстве. Плазмохим. технологию применяют для органич. и неорганич. синтеза, для получения ультрадисперсных порошков, плёнок органич. и неорганич. материалов, для получения мембран разл. типов, травления, модификации поверхности разных материалов и изделий, обработки полимеров, получения световодов и т. д. П. используется в физ. и хим. анализе.

Лит.: Теоретическая и прикладная плазмохимия, М., 1975; Плазмохимические реакции и процессы, под ред. Л. С. Подана, М., 1977; Цветков Ю. В., Папфилов С. А., Нижнотемпературная плазма в процессе восстановления, М., 1980; Соловьев И. и Д. И., Механизм химических реакций в неравновесной плазме, М., 1980; Подан Л. С., Михайлов А. С., Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах, М., 1983; Руксанов В. Д., Фригман А. А., Физика химических активных плазм, М., 1984; Подан Л. С., Гуров В. Б., Яковлев И. В. и др., Аналитические методы в химической кинетике, М., 1984; Бураченко Л. Т., Кудькин М. Г., Подан Л. С., Химия высоких энергий, М., 1988. Л. С. Подан.

**ПЛАНЕТАРНЫЕ ТУМАННОСТИ** — класс туманностей, ионизованных излучением. П. т. представляет собой разреженное, но довольно компактное светящееся газовое облако, окружающее горячую звезду, расположенную обычно в центре облака и наз. ядром туманности (рис.). П. т. являются расширяющимися оболочками, сброшенными ядрами. П. т. — один из основных поставщиков вещества в *межзвездную среду*,



Кольцеобразная планетарная туманность в созвездии Лирь (NGC 6720); размеры  $1' \times 1,5'$ , звезда в центре — ядро туманности.

обогащающих её тяжёлыми элементами. Значит. часть П. т. при наблюдении в телескоп имеет вид резко очерченных образований округлой формы (наименованных диски планет — отсюда название) зеленоватого цвета с весьма неупорядоченным распределением яркости. Ок. 20% всех П. т. составляют кольцеобразные туманности, наиб. многочисленны ( $\geq 50\%$  общего числа) т. н. звездообразные П. т., во внеш. виду не отличающиеся от звезд и отождествляемые лишь по спектру. Известно ок. 2000 П. т., принадлежащих Галактике. Неск. сотен П. т. открыто в др. галактиках. Подавляющее большинство П. т. имеет угл. размеры менее  $10''$ . Ср. радиус П. т.  $10^{17}$  см. Яркие П. т. часто имеют более слабую протяжённую оболочку, в нек-рых П. т. обнаружены гигантские гало с угл. размером, превышающим  $10'$ .

Спектр П. т. состоит из множества эмиссионных линий, наложенных на слабый непрерывный спектр (континуум). Наиб. интенсивными спектральными линиями являются т. н. линии «небуля» — *запрещённые линии* иона OIII. Их высокая интенсивность объясняется высокой темп-рой возбуждающей центральной звезды ( $\sim 10^4$  K), малой плотностью газа ( $10^3$ – $10^4$  атомов/см $^3$ ) и излучения. Наблюдаются также запрещённые линии ионов OII, NH, NeIII—V, SII, SIII и др. Свечение П. т. иррорсцирует за счёт *флуоресценции* — УФ-излучение горячей центральной звезды трансформируется в более ДВ-излучение туманности. Свечение в разрешённых спектральных линиях происходит в основном вследствие ионизации и последующей рекомбинации атомов HII, HeI и иона HeII. Запрещённые же линии возбуждаются в результате столкновений атомов и ионов со свободными электронами. Анализ эмиссионного спектра даёт осн. информацию о физ. условиях в П. т.: ср. электронной концентрации ( $10^3$ – $10^4$  см $^{-3}$ ), электронной темп-ре ( $1$ – $1,5 \cdot 10^4$  K), хим. составе, к-рый в среднем близок к солнечному, однако наблюдаются отличия, зависящие от принадлежности данной П. т. к подсистеме населения Галактики, а также от нач. массы родительской звезды. Непрерывный спектр П. т. обусловлен в основном рекомбинац. свечением HII, HeI и HeII. Излучением при свободно-свободных переходах (особенно в области  $\lambda > 12000$  Å), а также *визуальном излучении* водорода, особенно интенсивным в УФ-области спектра. П. т. являются также источниками непрерывного теплового радиоизлучения и радиоизлучения в линиях (*рекомбинационные радиолнии*  $H_{n\alpha}$ ,  $H_{n\beta}$ , ...,  $He_{n\alpha}$ ,  $He_{n\beta}$  и др., полосы молекул CO и H $_2$ ). Обнаружено также непрерывное ИК-излучение, представля-



кошее собой тепловое излучение пыли. Внеатмосферные наблюдения позволили исследовать далекую УФ-область спектра, вплоть до  $\lambda = 1000 \text{ \AA}$ . При этом были отмечены ранее не наблюдавшиеся новы. Проводятся также наблюдения П. т. в рентг. области спектра. В итоге в П. т. обнаружены: Н, He, С, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, S, Cl, Ar, K, Ca, Ti, Mn, Fe. Ядра П. т. имеют спектры, характерные для *Вольфа — Райе звезд*, звезд спектрального класса O с эмиссионными и абсорбционными линиями, а также с непрерывным спектром без заметных линий. *Светимости* ядер лежат в диапазоне  $(10-10^6) L_{\odot}$ , радиусы  $(0.01-1) R_{\odot}$  ( $L_{\odot}$ ,  $R_{\odot}$  — светимость и радиус Солнца). Массы ядер близки к массе Солнца ( $M_{\odot}$ ). Ср. масса туманностей ок.  $0.2 M_{\odot}$ . Ряд ядер П. т. является *вторичными звездами* (обнаружено ок. двух десятков). Большинство П. т. — очень далекие объекты, и поэтому их расстояния определены весьма ненадежно (с точностью до множителя 2 и хуже). Большая часть П. т. принадлежит промежуточной подсистеме населения *Галактики* (населению диска). Однако ряд объектов обнаружен в сферич. и плоской подсистемах, т. е. П. т. наблюдаются во всех подсистемах Галактики, кроме самой плоской, поскольку они не ассоциируются со спиральными рукавами. *Лучевые скорости*, измеренные для нек-рых П. т., показывают, что мн. объекты имеют не круговые, а сильно вытянутые эллиптич. орбиты движения вокруг центра Галактики.

Феномен П. т. возникает на поздней стадии *эволюции звезд* гл. последовательности умеренной массы ( $\leq 4 M_{\odot}$ ) при их прохождение на асимптотич. ветви гигантов (см. *Герцшпрунга — Рассела диаграмма*). На стадии слоев источников энергии (горение водорода и гелия во внеш. слоях звезды) происходит выброс внеш. слоя звезды, образующего П. т. В качестве возможных механизмов такого выброса рассматриваются лучевое давление и динамич. неустойчивость во внеш. слоях звезды, возникающая при тепловых пульсациях гелиевого источника в слое (возможно, и совокупность этих механизмов). После угасания гелиевого источника в слое завершается процесс ядерного горения в звезде. Звездный остаток (ядро звезды), состоящий в основном из углерода и кислорода, проходит фазу кованого сжатия, его темп-ра повышается. Затем наступает стадия охлаждения ядра ост. радиусе, и звезда в конце своей эволюции превращается в *белый карлик*. За это время выпрошенное вещество концентрируется (из-за роста темп-ры звезды), образуя компактную язву III, к-рая затем превращается в яркую, оптически толстую, молодую П. т. Постепенно расширяясь, туманность становится менее плотной и оптически тонкой, её поверхностная яркость падает, и в конце концов туманность становится невидимой. Скорость расширения П. т. невелика ( $\sim 20 \text{ км/с}$ ), время жизни в космич. шкале времени сравнительно мало ( $\sim 10^4-10^6$  лет). Непосредств. родоначальниками П. т. могут быть красные гиганты — полуправильные переменные или переменные типа Миры Кита (см. *Перемен-*

*ные звезды*), а также объекты-мазеры (см. *Мазерный эффект*) OH/IR. По-видимому, значит. часть белых карликов (если не все) при образовании должна проходить через стадию П. т. Е. Б. Костякова.

**ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ.** 9 больших планет Солнечной системы подразделяются на планеты земной группы (*Меркурий, Венера, Земля, Марс*) и планеты-гиганты, или планеты группы Юпитера (*Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун*), планета *Плутон* по своим размерам и свойствам значительно ближе к спутникам планет-гигантов.

Они характеризуются планет, включая параметры орбитального и вращат. движений, приведены в табл. 1. Гл. различие между двумя группами планет состоит в их размерах, массах и, следовательно, ср. плотности, что обусловлено разными соотношениями составляющих планеты трех осн. компонент: газов (в первую очередь самых летучих — водорода и гелия, обладающих к тому же очень низкими темп-рами конденсации), льдов (в основном воды, аммиака, метана) и горных (скальных) пород (железа, силикатов, оксидов магния, алюминия, кальция и др. металлов). Их часто называют соответственно легкой, тяжелой и железной компонентами.

Во время как планеты земной группы представляют собой твердые тела, практически целиком образованные тяжелой компонентой, планеты-гиганты являющиеся газожидными (содержание тяжелой компоненты, сосредоточенной в их ядрах, не превышает их массу нек-р. процентов). Юпитер в основном содержит водород и гелий (отношение He/H близко к солнечному,

Табл. 1. — Основные характеристики планет

Планета	Ср. гелиоцентрич. расстояние (большая полуось орбиты), а. е.	Эксцентриситет	Наклонение плоскости орбиты к эклиптике, град	Сидерический (орбитальный) период обращения (в земных годах)	Период вращения (в земных сутках и/или часах h)	Экваториальный радиус, км
Меркурий	0,387	0,206	7,0	0,24	58,6 <sup>d</sup>	2439
Венера	0,723	0,007	3,4	0,62	243,0 <sup>d</sup>	6051,5
Земля	1,000	0,017	0	1,000	23,9 <sup>h</sup>	6378
	(1,5 · 10 <sup>8</sup> км)			(365,256 сут)	(37°56'41')	
Марс	1,524	0,093	1,8	1,88	24,6 <sup>h</sup>	3394
Юпитер	5,203	0,048	1,3	11,86	9,9 <sup>h</sup>	7139,8*
Сатурн	9,539	0,056	2,5	29,46	10,2 <sup>h</sup>	60246*
Уран	19,182	0,047	0,8	84,07	17,24 <sup>h</sup> ± 4	25559
Нептун	30,058	0,009	1,8	164,8	16,02 <sup>h</sup>	24764
Плутон	39,439	0,247	17,1	248,6	6,4 <sup>h</sup>	1150

Продолжение

Планета	Объем (объем Земли = 1)	Масса (масса Земли = 1)	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Наклонение плоскости орбиты к эклиптике, град	Направление вращения	Число спутников	Напряженность магн. поля на экваторе, Гс	А-и-б-го	Эффективная температура, К
Меркурий	0,05	0,06	5,44	<30	Прямое	нет	0,0033	0,09	435
Венера	0,90	0,82	5,24	23,7	Обратное	нет	—	0,75	228
Земля	1,0	1,0	5,52	177,5	Прямое	1	0,31	0,36	255
	(1,083 × 10 <sup>13</sup> км <sup>3</sup> )	(5,976 × 10 <sup>24</sup> кг)							
Марс	0,15	0,11	3,95	25,2	Прямое	2	0,0008	0,24	216
Юпитер	1318	318	1,33	3,1	Прямое	16	4,28	0,34	124
Сатурн	755	95,1	0,69	28,4	Прямое	17	0,21	0,34	95
Уран	63	14,5	1,29	98	Обратное	15	0,25	0,34	58
Нептун	58	17,2	1,64	29	Прямое	8	0,13	0,31	59
Плутон	0,066	0,002	2,03	?	Прямое	1	—	0,50	37

\* Значение, соответствующее уровню с давлением в атмосфере 1 бар.

т. е. 0,2 по массе), а у Сатурна и особенно у Урана и Нептуна сильно возрастает вклад ледяной компоненты, достигающей, вероятно, у последних 85-90%. Твердой поверхности ни одна из планет группы Юпитера не имеет.

Как следует из табл. 1, существенно различаются также характеристики поступательно-вращат. дви-

жений планет. Эти движения являются возмущёнными; возмущения, возникающие вследствие взаимного притяжения планет, приводит к отклонениям их орбит от кеплерова эллипса (см. *Кеплера законы*). Свойства орбит определяются на основе аналитич. и численных решений ур-ний движения и теорем классич. небесной механики; дополнит. возмущение орбиты вследствие релятивистских эффектов заметно обнаруживается лишь в смещении перигелия Меркурия (см. *Жаганение*).

Тепловой режим планеты характеризуется ср. эффективной, или равновесной, темп-рой  $T_e$ . Она определяется из условия баланса энергии, поступающей от Солнца и падающей на поверхность в окружающее пространство. Для этих целей используются указанные в табл. 1 наряду с  $T_e$  значение интегрального сферич. альбеда (альбеда Бойда)  $A$ . На расстоянии  $a$  (в астр. единицах) планеты от Солнца

$$\frac{E_c(1-A)}{a^2} \pi R^2 = 4\pi R^2 \sigma T_e^4,$$

т. е.

$$T_e = \left[ \frac{E_c(1-A)}{4\sigma a^2} \right]^{1/4}. \quad (1)$$

Здесь  $E_c = 1,37 \cdot 10^8$  эрг·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> — *солнечная постоянная*;  $R$  — радиус планеты;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  эрг·см<sup>-2</sup>·K<sup>-4</sup>·с<sup>-1</sup> — *Стефана — Больцмана постоянная*;  $T_e$  — в кельвинах.

*Яркость температура* близка к равновесной. Исключения составляют Юпитер, Сатурн, Нептун, для к-рых яркостная темп-ра заметно выше равновесной. Это обусловлено наличием в их недрах внутр. источника тепла. Природу источника связывают с выделением гравитаци. энергии — либо за счёт продолжающегося сжатия (Юпитер), либо за счёт выпадения гелия из водородно-гелиевого раствора (Сатурн). Соответственно, значения  $T_e$  для планет-гигантов, приведённые в табл. 1, выше равновесных темп-р, определяемых соотношением (1).

Наличие даже сравнительно небольшой эллиптичности орбиты вызывает заметные сезонные изменения на планетах за счёт большего притока энергии от Солнца (инсоляции) в перигелии. Для Марса превышение составляет ок. 45%, а для Меркурия достигает 200%. Однако осн. роль в сезонных изменениях и их длительности играет наклон оси вращения (особенно в случае сопоставимости периода вращения с периодом обращения вокруг Солнца). Период вращения Марса вокруг оси почти равен земному, а у Венеры и Меркурия вращение аномально медленное, причём у Венеры направление вращения обратное. Солнечные сутки на Венере и Меркурия составляют соответственно 116,75 и 175,97 земных суток. Помимо Венеры обратным вращением обладают также Урае, осн. вращения к-рого лежит почти в плоскости его орбиты.

Среди планет земной группы атмосферы имеют лишь Земля, Венера и Марс. Меркурий, как и Луна, практически лишён газовой оболочки. Давление атмосферы у поверхности Венеры примерно на два порядка больше, а у поверхности Марса примерно на два порядка меньше, чем у поверхности Земли. Средняя темп-ра поверхности Венеры приблизительно 500°C (наличие плотной атмосферы приводит к значит. *парниковому эффекту*, а интенсивная циркуляция атмосферы выравнивает темп-ру поверхности).

В атмосфере Земли преобладают азот и кислород, в атмосферах Венеры и Марса — углекислый газ, относительное объёмное содержание к-рого на обеих планетах св. 95%, а атмосферы планет-гигантов в основном водородно-гелиевые.

Осн. сведения о хим. составе, темп-ре, давлении и плотности атмосфер планет, практически целиком основанные на результатах космич. экспериментов, приведены в табл. 2.

Из-за малости эксцентриситета и отклонения оси вращения от нормали к плоскости орбиты на Венере смены сезонов практически не происходит. В то же время для

Табл. 2. — Некоторые физико-химические характеристики планет

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Химический состав (объёмное содержание, %)	He < 20 H <sub>2</sub> < 18 Ne < 40- 60 Ar < 3 CO <sub>2</sub> < 2	CO <sub>2</sub> 95 N <sub>2</sub> 3-5 Ar 0,01 H <sub>2</sub> O 0,01-0,1 CO 3·10 <sup>-3</sup> HCl 4·10 <sup>-3</sup> HF 10 <sup>-3</sup> O <sub>2</sub> 2·10 <sup>-4</sup> SO <sub>2</sub> 10 <sup>-4</sup> H <sub>2</sub> S 8·10 <sup>-4</sup> Kr 4·10 <sup>-3</sup> Xe 10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-4</sup>	N <sub>2</sub> 78 O <sub>2</sub> 21 Ar 0,93 H <sub>2</sub> O 0,1-1 CO 0,03 CO 10 <sup>-3</sup> CH <sub>4</sub> 10 <sup>-4</sup> H <sub>2</sub> 5·10 <sup>-4</sup> Ne 2·10 <sup>-4</sup> He 10 <sup>-4</sup> Kr 10 <sup>-4</sup> Xe 10 <sup>-4</sup>	CO <sub>2</sub> 95 O <sub>2</sub> 2-3 Ar 1-2 H <sub>2</sub> O 10 <sup>-4</sup> - -10 <sup>-7</sup> CO 4·10 <sup>-3</sup> O <sub>2</sub> 0,1-0,4 Ne < 10 <sup>-4</sup> Kr < 2·10 <sup>-4</sup> Xe < 5·10 <sup>-4</sup>	H <sub>2</sub> 87 He 12,8 H <sub>2</sub> O 1·10 <sup>-4</sup> CH <sub>4</sub> 7·10 <sup>-3</sup> NH <sub>3</sub> 2·10 <sup>-3</sup> HCl 10 <sup>-3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 4·10 <sup>-3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 8·10 <sup>-3</sup> PH <sub>3</sub> 4·10 <sup>-3</sup> CO 2·10 <sup>-3</sup> CH <sub>4</sub> , D 2·10 <sup>-3</sup>	H <sub>2</sub> 94-97 He 6 **CH <sub>4</sub> 2·10 <sup>-3</sup> **NH <sub>3</sub> 3·10 <sup>-3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 5·10 <sup>-4</sup> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 2·10 <sup>-3</sup> PH <sub>3</sub> 1·10 <sup>-4</sup> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 4·10 <sup>-3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 8·10 <sup>-3</sup> PH <sub>3</sub> 4·10 <sup>-3</sup> CO 2·10 <sup>-3</sup> CH <sub>4</sub> , D 2·10 <sup>-3</sup>	H <sub>2</sub> 84-87 He 12-15 CH <sub>4</sub> 0,3 C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 9·10 <sup>-3</sup> NH <sub>3</sub> ? C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 2·10 <sup>-3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 3·10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>-4</sup>	**H <sub>2</sub> 85 **He 12 CH <sub>4</sub> 1-4 C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 3·10 <sup>-4</sup> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (1-3)· 10 <sup>-4</sup>	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> 7
Средняя молекулярная масса	—	43,2	28,97	43,5	2,26	2,12	2,3	2,2?	16?
Температура у поверхности (в средних широтах): T <sub>поверхн.</sub> , K T <sub>юпит.</sub> , K	500 110	— 735	310 240	270 200	— 135	— 105	— 51	— 50	≈32 —
Среднее давление у поверхности P, атм	2·10 <sup>-14</sup>	90	1	6·10 <sup>-3</sup>	0,5*	0,5*	0,1*	0,1*	—
Средняя плотность у поверхности, г/см <sup>3</sup>	10 <sup>-17</sup>	61·10 <sup>-3</sup>	1,27·10 <sup>-3</sup>	1,2·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-18</sup> *	1,2·10 <sup>-18</sup> *	5,5·10 <sup>-18</sup> **	≈5,5·10 <sup>-18</sup> **	—

\* На условном уровне в атмосфере планет, к к-рому отнесены соответствующие значения темп-ры. \*\*Предварительные данные.

Т а б л. 3. — Основные характеристики спутников планет

Планета и число спутников (на 1990 г.)	Спутники	Средний радиус, км*	Масса (в массах планеты)	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Альбе-до	Радиус орбиты		Период обращения (земные сутки)	Экс-центриситет орбиты	Накло-нение к эква-тору планеты, град	Дата открытия	Первоот-крытель	
						в ради-усах плане-ты	в 10 <sup>6</sup> км						
Земли (1) Марс (2)	Луна	1738	1,23·10 <sup>-2</sup>	3,33	0,07	60,27	384,4	27,322	0,055	5,09	—	—	
	Фобос Деймос	13,5 7,5	1,82·10 <sup>-2</sup> 2,14·10 <sup>-2</sup>	2,1 2,1	0,06 0,07	2,76 0,82	9,4 23,5	0,319 1,262	0,015 0,001	1,02 1,82	1877 1877	А. Холл А. Холл	
Юпитер (16)	XVI Ме-тиса	20	≈ 3·10 <sup>-11</sup>	—	< 0,10	1,81	129	0,300	~ 0,0	~ 0,0	1979	Дж. Джугитт, Д. Дэвид-сон («Воль-джер-2»)	
	XV Адра-стес	10	≈ 10 <sup>-11</sup>	—	< 0,10	1,80	128	0,295	0,0	~ 0,0	1979/80	С. Сивигот («Воль-джер-2») Э. Барнард	
	V Амаль-тея	100	≈ 5·10 <sup>-9</sup>	—	0,05	2,53	181	0,489	0,003	0,4	1892	С. Сивигот («Воль-джер-2») Ж. Барнард	
	XIV Теба (Фива)	45	≈ 3·10 <sup>-10</sup>	—	< 0,10	3,11	221	0,675	~ 0,00	~ 0,0	1979/80	С. Сивигот («Воль-джер-2») Э. Барнард	
	I Ио	1815	4,70·10 <sup>-2</sup>	3,53	0,62	5,95	421	1,769	0,004	0,0	1610	Г. Галилей	
	II Европа	1569	2,57·10 <sup>-2</sup>	3,03	0,68	9,47	670	3,551	0,000	0,5	1610	Г. Галилей	
	III Гани-мед	2631	7,84·10 <sup>-2</sup>	1,93	0,44	15,1	1070	7,155	0,001	0,2	1610	Г. Галилей	
	IV Кал-листо	2400	5,60·10 <sup>-2</sup>	1,83	0,19	26,6	1880	16,689	0,010	0,2	1610	Г. Галилей	
	XIII Леда	≈ 7	≈ 10 <sup>-12</sup>	—	—	—	156	11110	240	0,146	26,7	1974	Ч. Коваль (КФУЗЗ) Ч. Перрай
	VI Гима-лья	≈ 90	≈ 3·10 <sup>-10</sup>	—	0,03	161	11470	250,6	0,158	27,6	1904/05	С. Николсон Ч. Перрай	
	X Лисител	≈ 20	≈ 3·10 <sup>-11</sup>	—	—	164	11710	260	0,130	29,0	1938	С. Николсон	
	VII Эларя	≈ 40	≈ 3·10 <sup>-10</sup>	—	0,03	165	11740	260,1	0,207	24,8	1904/05	Ч. Перрай	
	XII Анап-сис	≈ 15	≈ 3·10 <sup>-10</sup>	—	—	291	20700	-617*	0,17	147	1951	С. Николсон	
	XI Карме	≈ 20	≈ 10 <sup>-11</sup>	—	—	314	22350	-692**	0,21	164	1938	С. Николсон	
	VIII Ша-сифе	≈ 20	≈ 3·10 <sup>-11</sup>	—	—	327	23300	-735**	0,38	145	1908	С. Николсон	
	IX Синопе	≈ 20	≈ 10 <sup>-11</sup>	—	—	333	23700	-758**	0,28	153	1914	С. Николсон	
XV Атлант	≈ 20	—	—	0,4	228	137,7	0,602	0,002	0,3	1980	Террай («Воль-джер-2») Коллинз и др.		
XVI Про-метей	40	—	—	0,6	2,31	139,4	0,613	0,004	0,0	1980	Коллинз и др. («Воль-джер-2») Коллинз и др.		
XVII Нан-дора	50	—	—	0,6	2,35	141,7	0,629	0,004	1,1	1980	Коллинз и др. («Воль-джер-2») Коллинз и др.		
X Янус	95	—	—	0,4	2,51	151,4	0,695	0,009	0,3	1966/80	О. Доль-фус («Воль-джер-2») Фонтейн,		
XI Эпиме-тея	60	—	—	0,4	2,52	151,5	0,695	0,007	0,1	1966/80	Ларсон/Уо-нер («Воль-джер-2») У. Гершель		
Сатурн (16) <sup>(2)</sup>	I Мимас	197	6,50·10 <sup>-4</sup>	1,4	0,7	3,08	185,5	0,942	0,020	1,5	1789	У. Гершель	
	II Энцелад	251	1,48·10 <sup>-3</sup>	1,2	1,0	3,93	128,0	1,370	0,004	0,0	1789	У. Гершель	
	III Тефия	524	1,09·10 <sup>-3</sup>	1,2	0,8	4,88	294,7	1,888	0,000	1,4	1684	Дж. Кассини	
	XIII Те-лесто	≈ 13	—	—	0,8	4,88	294,7	1,888	—	—	1980	Дж. Кассини Смит, Лар-сон, Фон-тейн («Воль-джер-2») Д. Наску, П. Сейдлмен, Вэум, Кюрбе («Воль-джер-2») Дж. Кассини Дж. Декаше, Лан	
	XIV На-липсо	≈ 13	—	—	0,8	—	—	—	—	—	1980	Д. Наску, П. Сейдлмен, Вэум, Кюрбе («Воль-джер-2») Дж. Кассини Дж. Декаше, Лан	
	IV Диона	560	2,04·10 <sup>-4</sup>	1,4	0,5	6,26	377,4	2,737	0,062	0,0	1684	Дж. Кассини	
	XII Елена	150	—	—	0,5	6,27	378,1	2,739	0,005	0,2	1980	Дж. Кассини Дж. Декаше, Лан	
	V Рея	765	—	1,3	0,8	8,74	527,1	4,518	0,001	0,4	1672	Дж. Кассини	
	VI Титан	2575	2,46·10 <sup>-3</sup>	1,9	0,2	20,25	1221,9	15,95	0,029	0,3	1655	Х. Гюйгенс	
	VII Гипо-нион	135	—	—	0,3	24,55	1481,0	21,28	0,104	0,4	1848	Дж. Бодд/У., Ласселл	
	VIII Япет	718	—	1,2	0,50/ 0,05***	59,02	3560,8	79,33	0,028	14,7	1671	Дж. Кассини	
	Уран (15)	IX Феба (1986 U7)	110	—	—	0,06	214,7	12954,0	-550,4**	0,163	150	1898	У. Пикеринг («Вольджер-2»)
		Корделия (1986 U8)	~ 20	—	—	—	1,92	49,8	—	—	—	1986	—
		Обелия (1986 U9)	~ 25	—	—	—	2,07	53,8	—	—	—	1986	—
		Бланка (1986 U3)	~ 25	—	—	—	2,30	59,2	—	—	—	1986	—
		Крессидя (1986 U6)	~ 30	—	—	—	2,40	61,8	—	—	—	1986	—
Дездемона (1986 U2)		~ 30	—	—	—	2,44	62,7	—	—	—	1986	—	
Димльте-та (1986 U1)		~ 40	—	—	—	2,51	64,4	—	—	—	1986	—	
Порция (1986 U4)		~ 40	—	—	—	2,57	66,1	—	—	—	1986	—	
Розалинда		~ 30	—	—	—	2,72	69,9	—	—	—	1986	—	

Планета и число спутников (на 1990 г.)	Спутники	Средний радиус, км*	Масса (в массах планеты)	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Альбедо	Радиус орбиты		Период обращения (земные сутки)	Эксцентриситет орбиты	Наклонение к экватору планеты, град.	Дата открытия	Первооткрыватель	
						в радиусах планеты	в 10 <sup>6</sup> км						
Юпитер	(1986 U5)	~30	—	—	—	2,92	75,3	—	—	—	1986	—	
	Белинда	85	—	—	—	—	3,35	86,0	—	—	1985	—	
	VI Ио	243	1,0 · 10 <sup>-7</sup>	3	—	—	5,04	129,4	1,460	0,010	0,0	1948	Дж. Койпер
	I Амальдеа	580	1,1 · 10 <sup>-8</sup>	1,3	0,30	7,43	191,0	2,555	0,003	0,0	0,0	1851	У. Ласселл
	II Европа	595	1,1 · 10 <sup>-8</sup>	1,4	0,19	10,35	266,3	4,013	0,004	0,0	0,0	1851	У. Ласселл
	III Ганимед	805	3,2 · 10 <sup>-8</sup>	2,7	0,23	16,96	436,0	8,760	0,002	0,0	0,0	1787	У. Гершель
	IV Ио	775	3,4 · 10 <sup>-8</sup>	2,6	0,18	22,70	583,5	13,51	0,001	0,0	0,0	1878	У. Гершель
	V Европа	1290	2,2 · 10 <sup>-8</sup>	2,06	—	15,95	394,7	—5,840**	0,000	2,79	0,0	1846	У. Ласселл
	VI Ио	~120	5,0 · 10 <sup>-8</sup>	2,0	—	250,99	6212	358,4	0,756	0,48	0,0	1949	Дж. Койпер
	Плуто (1)	Харон	~560	6,4 · 10 <sup>-8</sup>	~0,2	0,4	16	18,5	6,4	—	—	1978	Дж. Кристи

\* Для спутников неправильной формы указана половина максимального размера. \*\* Обратное движение. \*\*\* «Ведул» полусфера имеет альбедо на порядок выше ведомой. \* Помимо Тритона и Нереиды «Водородом-2» открыты еще 6 спутников: Пройг (420), Ларисса (260), Галатея (160), Деспина (140), Таласса (90) и Наяда (50) (в скобках приведены размеры в км). \* В 1990 открыт 18-й спутник Сатурна Пан.

Марса оба эффекта играют существенную роль, приводя форму южного полюса к более вытянутой, чем северного. Это объясняется тем, что в северном и южном полушариях. К тому же наклонение оси вращения Марса, возможно, испытывает долгопериодич. вариации, что должно приводить к глубоким климатич. изменениям. На Уране сезонный ход, казалось бы, должен быть наиб. сильно выражен; однако при малой insolации и своеобразии атм. динамики он, по-видимому, существенно нивелирован.

Газовым облоком Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна свойственно дифференциальное вращение (изменение периода вращения с широтой), что может быть связано с динамич. процессами в атмосфере. На Юпитере тропич. зона атмосферы вращается быстрее полярной на 5 мин 14 с, т. е. разнице составляет 1%, а на Сатурне достигает почти 5%. Для этих планет наиб. близок к истинному значению период, соответствующий вращению магн. поля. Он определяется по модуляции интенсивности и (или) направлению поляризации собств. радиоизлучения планеты. По-видимому, этот период наилучшим образом характеризует вращение нижележащих более вязких областей. Таким способом найдены периоды вращения Юпитера ( $T = 09,925^h$ ), Сатурна ( $T = 10,657^h$ ), Урана ( $T = 17,24^h$ ) и Нептуна ( $T = 16,02^h$ ).

В табл. 1 указана еще одна важная характеристика планет, создающая определенную информацию об их внутр. строении и эволюции и во многом определяющая свойства атмосферы и околопланетного пространства. Это — значение напряженности магн. поля на экваторе. Наиб. сильными магн. полями обладают Юпитер, Земля, Сатурн, Уран, Нептун. Заметим, что хотя у Нептуна, Сатурна и Урана оно слабее земного (при отнесении к соответствующим радиусам поверхности), в недрах этих планет мощность генератора их магн. поля должна быть примерно на два порядка выше. Существенное магн. поле обнаружено у Меркурия и, по-видимому, у Марса, практически отсутствует собств. поле у Венеры. Что касается Плутона, то, по аналогии с ледяными спутниками планет-гигантов, наличие у него магн. поля маловероятно.

У всех планет, кроме Венеры и Меркурия, есть спутники. Осн. характеристики спутников приведены в табл. 3. Общее число известных спутников составляет 61, включая сравнительно недавно открытые 3 спутника Юпитера, 7 спутников Сатурна, 10 спутников Урана, 6 спутников Нептуна и спутник Плутона. Наиболее крупными спутниками обладают Земля,

Юпитер, Сатурн и Нептун. Это Луна, четыре галилеевых спутника Юпитера (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто), спутник Сатурна Титан и спутник Нептуна Тритон, которые по своим размерам сопоставимы с планетами земной группы. Остальные спутники имеют размеры от неск. десятков до мн. сотен километров и, в отличие от планет и более крупных спутников, — часто неправильную (несферическую) форму. Это сблизает их с астероидами.

Лит.: Жарков В. Н., Внутреннее строение Земли и планет, 2 изд., М., 1983; Маро в М. Я., Планеты Солнечной системы, 2 изд., М., 1986; Уиллс Ф. Л., Семья Солнца, пер. с англ., М., 1984; Sateilites, ed. by J. Vinti, M. Sharley Matthews, Tucson, 1986. См. также лит. при отд. статьях о планетах. М. Я. Маров.

Модели внутреннего строения планет. Недра планет недоступны прямым наблюдениям. Даже для Земли керны из глубоких (до 12 км) скважин и фрагменты изверженных глубинных пород дают сведения о составе и структуре вещества лишь приповерхностных слоев внеш. твердой оболочки. Данные о породах Луны, Венеры и Марса, изучение спектральных особенностей поверхностей планет и астероидов, атмосфер планет-гигантов также позволяют судить лишь о составе самых внешних оболочек. Поэтому для исследования планетных недр прибегают к построению моделей внутр. строения планет, т. е. расчёту хим. и минерального состава, внутр. гравитационных, тепловых, магн. и др. полей с последующим сравнением теоретич. предсказаний с данными наблюдений. Весьма общие ограничения на возможные состав и структуру планеты дают сведения о её массе  $M$  и радиусе  $R$  (а следовательно, и о ср. плотности) с учётом распространённости элементов в космосе и данных физики высоких давлений. Для построения моделей планет привлекаются данные по гравитационным и магн. полям планеты, тепловому потоку из недра, собств. колебаниям и (для Земли и Луны) сейсмич. данным.

Планеты земной группы имеют твёрдые оболочки, в к-рых сосредоточена б. ч. их массы. Существенный объём планетных оболочек находится в состоянии, близком к гидростатич. равновесию, поскольку предел текучести пород играет роль лишь для относительно быстрых приповерхностных движений. Распределения давления  $P$ , плотности  $\rho$  и ускорения силы тяжести  $g$  по расстоянию от центра планеты  $r$  складываются из решения системы ур-ний: ур-ния гидростатич. равновесия

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2} = -g(r)\rho(r),$$

ур-ний распределения массы

$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2(\rho(r))$$

и ур-ний состояния

$$\rho_i = \rho_i(P)$$

Для предполагаемой смеси компонентов с плотностью  $\rho = (\sum_i \rho_i^{-1})^{-1}$ , где  $\rho_i$  и  $x_i$  — плотность и доля  $i$ -й компоненты по массе ( $x_i = m_i/m$ ,  $m_i$  — масса  $i$ -й компоненты,  $M$  — суммарная масса в единичном объёме). Ср. плотности планет и данные по ур-ниям состояния для осн. породобразующих элементов Si, Mg, Fe, Al, Ca и их оксидов показывают, что в среднем планеты земной группы на  $2/3$  состоят из ферромагнетических силикатов и на  $1/3$  из железа с примесью никеля и др. элементов. Модели внутр. строения Земли благодаря глубинному сейсмич. зондированию, данным о нутации и прецессии разработаны весьма детально, и осуществляется переход к более сложным моделям, учитывающим особенности горизонтального строения литосферы и верхней мантии под океаном, и континентальными регионами. Для построения моделей планет земной группы широко используются представления об оболочечной структуре, полученные для Земли. Обычно выделяют кору (10—100 км), мантию (1000—3000 км) и ядро. Ядро — наиб. плотная часть (12—13 г/см<sup>3</sup> в центре Земли), кора — наименее плотная (для Земли 2,7—2,8 г/см<sup>3</sup>), плотность мантии — промежуточная (для Земли 2,8—3,5 г/см<sup>3</sup>). У Земли ядро подразделяется на внешнее (жидкое) и внутреннее (твёрдое). Предполагают, что жидкое ядро имеется у Меркурия и Венеры. Марс, обладая заметным вращением, имеет сравнительно небольшую магн. момент, и существование расплавленного ядра для него остаётся под вопросом. Внутр. строение Венеры в основном схоже со строением Земли, однако из-за медленного вращения Венеры не удаётся оценить её момент инерции и, следовательно, в отсутствие сейсмич. данных, нет строгого подтверждения существования у неё ядра и соответствующих земным верхней и нижней мантийных оболочек. Отсутствие сейсмич. данных не позволяет также сделать определённые выводы о структуре и размерах оболочек др. планет земной группы. Момент инерции Марса свидетельствует о наличии небольшого ( $\leq 15\%$  от массы планеты) ядра. Размеры и фазовое состояние ядра зависят от его хим. состава (рис. 1). На больших временах ( $10^8$ — $10^9$  лет) вещество планетных недр ведёт себя как вязкая жидкость. В результате неравномерных нагрева и распределения состава в оболочках могут возникать конвективные движения, приводящие к тепло- и массопереносу. Масштаб конвекции определяется величиной отклонений распределений темп-ры и состава от равновесных, а интенсивность — вязкостью и др. реологич. параметрами. Оценки темп-р в недрах планет земной группы основаны на представлениях об их образовании путём аккумуляции из твёрдых тел и относительно равном формировании оболочек (в ходе этих процессов происходило выделение гравит. энергии  $\sim 10^{11}$  эрг/г), а также на данных о сохранении радиоакт. элементов U, Th и <sup>40</sup>K. Согласно оценкам, темп-ра в центре Земли  $\approx 5000$ — $6000$  K, на границе ядро — мантия —  $3500$ — $4000$  K. Темп-ры центральных областей Венеры, по-видимому, на  $100$ — $300$  K ниже земных. В ядрах Меркурия и Марса темп-ра, вероятно, ок.  $2500$ — $3000$  K.



Рис. 1. Модель внутреннего строения Марса. Показаны два варианта ядра.

П л у т о в, по-видимому, имеет силикатное ядро и ледяную оболочку.

Астероиды д.ш. О внутр. строении астероидов также известно мало. Вторичные данные указывают на то, что вещество малых планет (по крайней мере многих из них) прошло через интенсивную ударную переработку, нагрев и дегазацию уже в ходе их образования. Существование каменных и железных метеоритов свидетельствует о том, что недра отд. астероидов были нагреты до темп-р плавления, обеспечивших возможность расщепления (дифференциации) первичного вещества на силикаты и железноникелевый сплав. Осн. особенностью внутр. строения малых планет являются сравнительно низкие темп-ры и давления, а также относительно большая толщина неконсолидиров. пород (реолит), образованного ударами др. тел. Не исключено, что астероиды, от к-рых поступают дифференциров. вещества, не расплавлены на соответствующие оболочки, а содержат лишь отд. области, испытавшие высокотемпературный нагрев и местную дифференциацию вещества (модель «эзмикинг в тесте»).

П л а н е т ы - г и г а н т ы принято считать газожидкими телами с конвективными оболочками, в к-рых распределение темп-ры близко к адиабатическому. Это заключение основано на след. данных наблюдений. По данным ИК-наблюдений, поток тепла из недр планет оказался равным  $10^4$  эрг/см<sup>2</sup>.с (для Юпитера) и  $3 \cdot 10^3$  эрг/см<sup>2</sup>.с (для Сатурна). Поскольку такой поток более чем на 4 порядка превышает поток тепла за счёт молекулярной теплопроводности, то это указывает на конвективное состояние внеш. зонны или всей планеты. Юпитер, Сатурн, Уран и, возможно, Нептун обладают соств. магн. полем, к-рое, вероятно, генерируется в конвективном ядре. Эволюция орбит спутников Юпитера, Сатурна и Урана, измерения гравитат. поля Юпитера также указывают на жидкое, близкое к гидростатически равновесному, состояние планет.

Хим. состав планет-гигантов резко отличается от состава планет земной группы. Согласно теории происхождения Солнечной системы, в протопланетном облаке в области планет-гигантов темп-ры после остывания облака не превышали  $150$  K, а газовое давление  $10^{-3}$ — $10^{-1}$  бар (в зоне Юпитера и Сатурна) и  $10^{-2}$ — $10^{-8}$  бар (в зоне Урана и Нептуна). При таких условиях большинство элементов образуют гидриды и окислы. Вещества, из к-рых построены планеты-гиганты, принято разделять по летучести на газовую компоненту —  $\text{Г}(\text{H}_2, \text{He}, \text{Ne})$ , «льды» —  $\text{Л}(\text{CH}_4, \text{NH}_3, \text{H}_2\text{O})$  и тяжёлую компоненту —  $\text{ТКЛ}(\text{SiO}_2, \text{MgO}, \text{FeO}, \text{Fe}, \text{Ni}, \dots)$ . Сведения о хим. составе недр планет-гигантов даёт расчёт моделей внутр. строения планет, удовлетворяющих

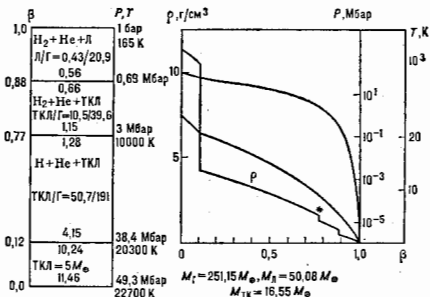


Рис. 2. Четырёхслойная модель Юпитера с двухслойной молекулярной оболочкой. Справа показано распределение давления P, темп-ратуры T и плотности  $\rho$  по относительному радиусу  $r = r/R_{\text{Ю}}$  ( $R_{\text{Ю}}$  — радиус Юпитера). Слева дан расчёт модели с указанием значений плотности на границах раздела и относительной  $\text{L}(\text{TKL})/\text{Г}$  в оболочках. Полные значения масс Г, Л- и ТКЛ-компонент выражены в массах Земли.

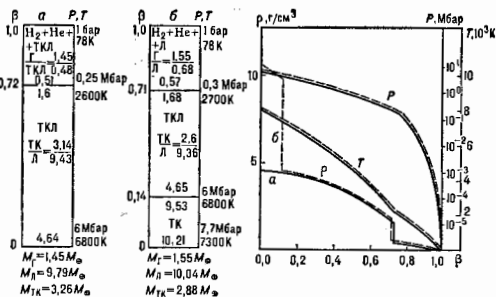


Рис. 3. Двух- и трёхслойная модели Урана с различной степенью смешения Г-, Л- и ТК-компонент. Обозначения те же, что и на рис. 2.

наблюдаемым значениям массы, радиуса и зональных гармоник гравитационного поля планеты. Из-за относительно большой угл. скорости вращения  $\omega$  в ур-ние (1) входит дополнительный член  $(2/3)\omega^2 r^2 \rho(r)$ , а вследствие довольно высоких темп-р ( $\approx 10^4$  К) в недрах планет в ур-нии (3) учитываются температурные поправки  $\rho_i = \rho_i(P, T)$ . Простейшие модели (двухслойные) состоят из наружной оболочки (Г+Л) и ядра (ТКЛ). Однако наблюдениям лучше удовлетворяют многослойные модели (см., напр., рис. 2). В оболочках Юпитера и Сатурна происходит переход молекулярного водорода в металлический. Давление перехода  $\approx 3 \cdot 10^6$  бар и слабо зависит от темп-ры. При переходе к твёрдой фазе плотность скачкообразно увеличивается на  $\approx 10\%$ . В расливал. состоянии (в жидкой фазе) переход происходит непрерывным образом. Расчёты моделей показали, что Уран (рис. 3) и Нептун, в отличие от Юпитера и Сатурна, обладают сильнонеравновесными оболочками. Эти планеты имеют маленькие ТК-ядра (0,3–1% от полной массы планеты), массивные ледяные мантии с добавкой ТК-компоненты (с отнесит. содержанием, близким к солнечному) и наружные оболочки из Г- и Л-компонент. Построенные модели выявили след. тенденции в ряду планет-гигантов: при переходе от Юпитера к Нептуну содержание свободного водорода систематически убывает, а концентрация Л-компоненты в наружных оболочках растёт. Это может быть связано с различиями во временах формирования планет-гигантов и диссипацией газа из протопланетного облака.

Широкое распространение получает численное моделирование динамических (2- и 3-мерных) и эволюционных (1–2-мерных) моделей внутр. строения планет. Исследуются структура и интенсивность конвективных течений, вызванных разл. источниками тепла, влияние фазовых переходов и хим. превращений. Для планет земной группы предложены модели дифференциации и фракционирования внутр. оболочек, основанные на ур-ниях баланса потоков вещества с привлечением изотопных данных.

Лит.: Жарков В. Н., Трубицын В. П., Физика планетных недр, М., 1980; Хаббард У., Внутреннее строение планет, пер. с англ., М., 1987; Планетная космогония и науки о Земле. Сб., под ред. В. А. Мажигоро, М., 1989.

А. В. Вильямс, В. В. Леонтьев.

**ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА** — раздел матем. статистики, в к-ром рассматриваются задачи оптимального планирования экспериментов. Набл. изучена след. схема П. э. Измеряется ф-ция  $\varphi(x, \theta)$ , где  $\theta$  — вектор неизвестных или известных параметров,  $x$  — вектор переменных (факторов), к-рые контролируются экспериментатором. Совокупность значений вектора  $x$ , при к-рых проводятся измерения ф-ции  $\varphi(x, \theta)$ ,

наз. планом эксперимента. В связи с планированием выделяют след. типы экспериментов: экстремальный эксперимент, определяющий значения факторов  $x$ , при к-рых ф-ция  $\varphi(x, \theta)$  (ф-ция отклика) принимает экстремальные значения; эксперимент по проверке справедливости заданной статистической гипотезы — ф-ции  $\varphi(x, \theta)$  (дискриминирующий эксперимент); отсеивающий эксперимент, задача к-рого заключается в выделении значимых факторов; имитат. эксперимент, моделирующий изучаемое явление на ЭВМ. В зависимости от типа эксперимента конструируются критерии оптимальности плана эксперимента. Решение соответствующей экстремальной задачи даёт оптимальный план данного эксперимента. Напр., если предполагается справедливой линейная модель экспери-

$$Y_n = \varphi(x_n, \theta) + \varepsilon_n \equiv \sum_{i=1}^k a_i \varphi_i(x_n) + \varepsilon_n,$$

где  $\varphi_i(x)$  — заданные ф-ции,  $\varepsilon_n$  — ошибки измерения,  $a_i$  — неизвестные параметры, то D-оптимальным планом наз. набор  $x_n$ ,  $n = 1, \dots, N$ , минимизирующий определитель матрицы ошибок параметров  $a_i$ .

Лит.: Налимов В. В., Чернова Н. А., Статистические методы планирования экстремальных экспериментов, М., 1965; Налимов В. В., Теория эксперимента, М., 1971; Федоров В. В., Теория оптимального эксперимента, М., 1971; Математическая теория планирования экспериментов, М., 1989.

**ПЛАНКА ЗАКОН ИЗЛУЧЕНИЯ** (формула Планка) — закон распределения энергии в спектре излучения равновесного при определённой темп-ре T. Выл. впервые выведен М. Планком (М. Planck) в 1900 на основе гипотезы квантования энергии вещества. Планк моделировал вещество совокупностями гармоник, осциллирующих различной частоты  $\nu$  — резонаторов, испускающих и поглощающих излучение соответствующей частоты. Он предположил, что энергия вещества распределяется по резонаторам каждой частоты  $\nu$  в виде дискретных порций  $h\nu$  — квантов энергии и ( $h$  — Планка постоянная). В 1916 А. Эйнштейн (A. Einstein) вывел П. э. к путём рассмотрения квантовых переходов для атомов, находящихся в равновесии с излучением. П. э. и является частным случаем распределения Бозе — Эйнштейна (см. Бозе — Эйнштейн статистика).

П. э. и. даёт спектральную зависимость (зависимость от частоты  $\nu$  или длины волны  $\lambda = c/\nu$ ) объёмной плотности излучения (энергии излучения в единице объёма) и пропорциональной ей испуск. способности абсолютно чёрного тела  $e = cu/4$  (энергии излучения, испускаемой единичной его поверхностью за единицу времени). Ф-ции  $u_{\lambda, T}$  и  $e_{\lambda, T}$  (или  $u_{\nu, T}$  и  $e_{\nu, T}$ , отнесённые к ед. интервала частот (или длин волн)), являются универсальными ф-циями от  $\nu$  (или  $\lambda$ ) и T, не зависящими от природы вещества, с к-рым излучение находится в равновесии.

П. э. к. выражается ф-лой

$$u_{\lambda, T} = \frac{4}{c} e_{\lambda, T} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

или

$$u_{\lambda, T} = \frac{4}{c} e_{\lambda, T} = \frac{8\pi h c}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}. \quad (*)$$

Максимум ф-ции (\*) с ростом T смещается в сторону малых  $\lambda$ .

Из П. э. и. вытекают др. законы равновесного излучения. Интегрирование по  $\nu$  (или  $\lambda$ ) от 0 до  $\infty$  даёт значения полной объёмной плотности излучения всех частот — Стефана — Больцмана закон излучения:

$$u_T = \int_0^\infty u_{\nu,T} d\nu = aT^4, \text{ где } a = \frac{8\pi^5 h^4}{15c^3 k^4}$$

и полной испуск. способности чёрного тела

$$e_T = \int_0^\infty \epsilon_{\nu,T} d\nu = \sigma T^4, \text{ где } \sigma = \frac{2\pi^5 h^4}{15c^2 k^4}$$

В области больших частот, когда энергия фотона много больше тепловой энергии ( $h\nu \gg kT$ ), П. з. и переходит в *Вина закон излучения*:  $u_{\nu,T} = (8\pi^5 h^4 / 15c^3 k^4) \exp(-h\nu/kT)$ , в области малых частот ( $h\nu \ll kT$ ) — в *Рэлея — Джинса закон излучения*:  $u_{\nu,T} = (8\pi^5 / 15c^3 k^4) kT$ . Т. о., эти законы представляют собой предельные случаи П. з. и.

П. з. и. находится в согласии с эксперим. данными, применяя его можно по этим данным вычислить значения  $h$  и  $k$ . С помощью методов *пирометрии оптической* можно на основе П. з. и. определять темп-ру нагретых тел.

Лит.: Борн М., Атомная физика, пер. с англ., 3 изд., М., 1970; Си в у х и Д. В., Общий курс физики, 2 изд., т. 41 — Оптика, М., 1985; К и п Т. з., *Klein-body theory and the quantum discontinuity*, Oxf., 1978; см. также лит. при ст. *Теплово излучение*.

М. А. Ельжичев.

**ПЛАНКА ПОСТОЯННАЯ** (квант действия, обозначается  $h$ ) — фундаментальная физ. константа, определяющая широкий круг физ. явлений, для к-рых существует дискретность величин с размерностью действия (см. *Квантовая механика*). Введена М. Планком в 1900 при установлении закона распределения энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела (см. *Планка закон излучения*). Наиб. точное значение П. п. получено на основе *Джозефсона эффекта*:  $h = 6,626176(36) \cdot 10^{-34}$  Дж·с =  $6,626176(36) \cdot 10^{-27}$  эрг·с (на 1977). Чаше пользуются постоянной  $\hbar = h/2\pi = 1,0545887(57) \cdot 10^{-34}$  Дж·с, также называемой П. п.

**ПЛАНКОВСКАЯ ДЛИНА** — величина размерности длины, выражаемая через фундам. физ. постоянные — скорость света  $c$ , гравитационную  $G$  и постоянную Планка  $h$ :

$$l_{Pl} = \sqrt{G\hbar/c^3} \approx 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см.}$$

Введена в физику М. Планком из соображений размерности. По совр. представлениям, при расстояниях порядка  $l_{Pl}$  и промежутках времени порядка планковского,  $t_{Pl} = l_{Pl}/c \approx 5,4 \cdot 10^{-44}$  с, перестаёт быть применимо понятие непрерывного пространства-времени, и квантовые флуктуации фундам. метрич. тензора  $g_{\mu\nu}$  ( $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ ) становятся порядка 1. См. *Квантовая теория гравитации*.

И. Д. Новиков.

**ПЛАНКОВСКАЯ МАССА** — величина размерности массы, выражаемая через фундам. физ. постоянные — скорость света  $c$ , гравитационную  $G$  и постоянную Планка  $h$ :

$$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G} \approx 2,2 \cdot 10^{-9} \text{ г.}$$

Введена М. Планком из соображений размерности. Согласно совр. представлениям, при энергии, соответствующей П. м.:  $\epsilon_{Pl} = m_{Pl} c^2 \approx 10^{19}$  ГэВ, гравитационное взаимодействие становится сильным и объединяется с тремя др. взаимодействиями — слабым, сильным и электромагнитным. См. *Квантовая теория гравитации, Супергравитация*.

И. Д. Новиков.

**ПЛАНКОВСКИЙ ПРОМЕЖУТОК ВРЕМЕНИ** — величина размерности времени, выражается через планковскую длину  $l_{Pl}$  соотношением  $t_{Pl} = l_{Pl}/c \sim 10^{-44}$  с.

**ПЛАСТИНКА** — твёрдое деформируемое тело, имеющие форму прямой призмы или прямого цилиндра, высота к-рых (толщина П.) мала по сравнению с размерами основания. По очертанию основания П. делится на прямоугольные, круглые, эллипсоидальные и др. Плоскость, делящая пополам их толщину, наз. с р е д и н о й п л о с к о с т ь ю П. Бывают постоянной и переменной толщины; в зависимости от структуры могут

быть изотропными, ортотропными и т. д. П. широко применяются в технике и строительстве как элементы раэл. конструкций и сооружений; в акустике используются в качестве элементов излучателей и приёмников звука, преград в звуковом поле и др.

В зависимости от характера действующих сил различают П., работающие на изгиб при поперечной нагрузке и на растяжение, сжатие или сдвиг при нагрузке, действующей в срединной плоскости.

При деформации изгиба П. получают перемещения (прогибы), нормальные к срединной плоскости. Поверхности, к-рую образуют точки срединной плоскости после деформации, наз. с р е д и н н о й п о в е р х н о с т ь ю. В зависимости от характера напряжённого состояния различают жёсткие, гибкие П. и абсолютно гибкие, или *мембраны*. В случае жёсткой П. можно без заметной погрешности считать срединный слой пёйтральным, т. е. свободным от напряжений. Гибкими наз. П., при расчёте к-рых необходимо наряду с чисто изгибными учитывать напряжения, равномерно распределённые по толщине (мембранные напряжения). В мембранах преобладающими являются напряжения в срединной поверхности; напряжениями же собственно изгиба здесь можно пренебречь.

Металлич. П. можно рассматривать как жёсткие, если макс. прогиб не превышает  $1/6$  толщины; при прогибе, лежащем между  $1/6$  и 5 толщинами, П. можно отнести к гибким; наконец, при прогибе, превосходящем 5 толщин, П. являются абсолютно гибкими.

В теории жёстких П. используется, как правило, гипотеза прямых нормалей (гипотеза Кирхгофа — Лява), по к-рой любая прямая, нормальная к срединной плоскости до деформации, остаётся и после деформации прямой, нормальной к срединной поверхности. При этом длина волокна вдоль толщины остаётся неизменной. Однако в ряде случаев гипотеза недеформируемых прямых нормалей является неприемлемой. Это относится, напр., к трёхслойным и многослойным П., а также к П., изготовленным из композиц. материалов, когда некие слои получают значит. деформации поперечного сдвига. Одну из моделей деформации П. с учётом поперечного сдвига называют, в отличие от модели Кирхгофа — Лява, моделью Тимошенко.

Рассмотрение деформации П. за пределами упругости ведётся на основе тех или иных *пластичности теорий*: теории малых упругопластич. деформаций, теории течения и др. При решении задач с помощью теории малых упругопластич. деформаций может быть применён метод упругих решений, состоящий в построении ряда последоват. приближений, для каждого из к-рых применяется аппарат упругой задачи. Если поведение материала П. зависит от времени, расчёт ведётся с помощью *ползучести теории*, в частности так рассчитывают конструкции, испытывающие действие высоких темп-р.

В ряде конструкций П. испытывают действие усилий в срединной поверхности. В тех случаях, когда П. в целом или отд. её части подвергаются сжатию или сдвигу, они могут потерять устойчивость (см. *Устойчивость упругих систем*). Соответствующие моменты потери устойчивости критич. напряжения зависят от условий закрепления П. и их жёсткости. В упругой области параметр жёсткости определяется модулем упругости и коэф. Пуассона материала, а также толщиной П. Характерным для тонких П. является то, что при валичии надлежащим образом расположенных подкрепляющих рёбер П. сохраняют способность нести нагрузку и после потери устойчивости.

Для П., испытывающих преобладающие усилия растяжения, а также в ряде др. случаев статич. и динамич. нагружения может иметь место процесс зарождения и развития трещин. Это особенно характерно для П., подвергающихся действию нагрузок, переменных во времени. Соответствующий процесс т. н. установочного разрушения определяется такими факторами, как порядок следования нагрузок, длительность нагружения

на каждом уровне, влияющие внеш. среды, состояние поверхности, масштабный фактор и др. Для подкреплённых П. характерным является то, что развитие трещин зависит от их расположения по отношению к подкреплённым ребрам.

Важнейший класс теорий П. составляют динамич. задачи: изучение собственных, вынужденных, параметрич. колебаний, а также автоколебаний разл. типа, напр. при флаттере. Рассмотрение осев. типов колебаний ведётся с позиций линейной теории для жёстких П. и нелинейных зависимостей, относящихся к гибким и абсолютно гибким П. Большое значение для совр. техники имеет исследование поведения П. при выстр. (динамич.) нагрузках и при действии ударных нагрузок. Несущая способность П. при динамич. приложениях усилий сжатия и сдвига в срединной поверхности оказывается выше, чем при статич. нагрузках. При изучении динамич. устойчивости должны учитываться форма прикладываемых к П. импульсов и их последовательность. При исследовании динамич. задач для П. в ряде случаев должны приниматься во внимание волновые процессы в материале П., связанные с деформациями в срединной поверхности, и силы инерции, отвечающие деформациям сдвига (по модели Тимошенко). Соответствующие ур-ния движения являются гиперболическими.

Широкое развитие в теории и расчёте П. получили, так же как и для оболочек, наряду с аналитическими численными методами, связанные с использованием ЭВМ. К общему понятию П. относятся также т. н. толстые плиты, расчёт к-рых ведётся на основе трёхмерных ур-ний теории упругости.

Лит.: Тимошенко С. П., Вольвоиский К. Кригер С., Пластинки и оболочки, пер. с англ., 2 изд., М., 1966; Бубнов И. Г., Труды по теории пластин, М., 1953; Мольман А. С., Гибкие пластины и оболочки, М., 1956; Стгоже, Иславиная динамика пластин и оболочек, М., 1972; Амбарумян С. А., Теория анзотропных пластин, М., 1967; Болотин В. В., Новичков Ю. Н., Механика многослойных конструкций, М., 1980. А. С. Волынский.

**ПЛАСТИНКИ** в акустике — элементы излучателей и приёмников звука, элементы устройств акустоэлектроники, а также звуковых преград и перегородок.

П. толщиной  $2h$  могут рассматриваться как изурый волновод, поле в к-ром является совокупностью волн, наз. *нормальными волнами*. В общем случае произвольной частоты  $\omega$  нормальная волна содержит продольную и поперечную компоненты колеб. смещения, распространяющиеся в толще П. и отражающиеся на её границах. Нормальные волны в П. подразделяются на два класса: *Ламба волны*, у к-рых имеются как продольные, так и поперечные компоненты колеб. смещения, причём последние направлены перпендикулярно плоскости П., и поперечные нормальные волны, обладающие только одной компонентой смещения (отсутствующей в волнах Ламба), лежащей в плоскости П. и перпендикулярной направлению распространения волны. В П. может распространяться определённое конечное число нормальных волн, отличающихся одна от другой фазами и групповыми скоростями, а также распределениями смещений и напряжений по толщине П. Эти распределения должны удовлетворять граничным условиям равенства нулю напряжений на обеих поверхностях П.

Число  $n$  узловых точек в распределении напряжений по толщине П. наз. порядком волны. Нормальная волна частоты  $\omega$ , порядка  $n$  может распространяться в П. при условии  $\omega > \omega_{кр} = \pi c_1 / h$ , где  $c_1$  — фазовая скорость поперечной волны в изотропном твёрдом теле,  $c_1 = \sqrt{E/2\rho(1+\nu)}$ ,  $E$  — модуль Юнга,  $\nu$  — коэф. Пуассона,  $\rho$  — плотность материала П.,  $\omega_{кр}$  — т. н. критич. частота. Число распространяющихся волн тем больше, чем больше значение  $\omega h / c_1$ . Волна заданного порядка  $n$  с частотой  $\omega < \omega_{кр}$  не распространяется: в такой волне нет потока энергии, она представляет собой сифазное движение, экспоненциально спадающее в направлении, параллельном плоскости П.

В тонких П. ( $\omega h / c_1 \ll 1$ ) возможно распространение только поперечной волны нулевого порядка, смещения в к-рой по толщине П. одинаковы, а также двух волн Ламба нулевого порядка, первая из к-рых очень похожа на продольную волну в изотропном твёрдом теле (в ней преобладает продольная компонента смещения), а вторая представляет собой *изгибную волну*. При распространении изгибной волны каждый элемент тонкой П. смещается перпендикулярно её плоскости. Примерами изгибных волн в П. являются стоячие волны в деках музыкальных инструментов, в диффузорах громкоговорителей. Распространяющаяся в тонкой П. изгибная волна малой амплитуды описывается ур-нием

$$\frac{Eh^3}{3(1-\nu^2)}\Delta^2\eta + \rho\frac{\partial^2\eta}{\partial t^2} = 0,$$

где  $\Delta$  — оператор Лапласа,  $\eta$  — смещение элемента П. от положения равновесия в направлении, перпендикулярном её плоскости.

Для изгибных волн тонкая П. является системой с дисперсией: волны разл. частот распространяются в ней с разл. фазовыми скоростями  $c_n$ ,

$$c_n = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{3\rho(1-\nu^2)}}\sqrt{\omega}.$$

Эта скорость много меньше фазовой скорости продольных волн в П.  $c_{пр} = c_1\sqrt{(1-2\nu)/(1-\nu^2)}$ , где  $c_1$  — скорость продольной волны в изотропной сплошной среде.

Тонкая П. ограниченного размера обладает дискретным набором собств. частот, каждой из к-рых соответствует своя форма колебаний, представляющая систему стоячих волн с той или иной картиной узловых линий, разделяющих части П., колеблющиеся с противоположными фазами (см. *Хабити физурм*). Собств. частоты и формы колебаний зависят от изгибной жёсткости пластины, равной  $D = 2Eh^3/3(1-\nu^2)$ , её уд. массы  $2\rho h$ , от размеров и формы П., а также от условий закрепления её краёв. Типичными условиями закрепления краёв являются свободный край, шарниро-опёртый край, заделанный край.

Определение спектра собств. частот в общем случае представляет сложную задачу. Осев. частота может быть определена с помощью метода Рэлея — Ритца. Она составляет, напр., для прямоугольной шарнирно-опёртой П. размером  $a \times b$  величину

$$\omega_{0,n} = \pi^2\sqrt{Eh^3/3\rho(1-\nu^2)}\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}\right),$$

а для круглой П. радиуса  $a$ , заделанной по краям, величину

$$\omega_{0,n} \approx 0,94\frac{\pi^2}{a^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}(1-\nu^2)}.$$

Обертоны осев. частоты круглой П. не являются гармониками.

Вынужденные колебания П. происходят с частотой внеш. воздействия. При её совпадении с одной из собств. частот имеет место *резонанс*.

В процессе колебаний П. излучает звук в прилегающую среду при условии, что

$$\omega > \omega_1 = c_1\sqrt[2]{\frac{3\rho(1-\nu^2)}{Eh^3}},$$

где  $c_1$  — скорость звука в прилегающей среде. При  $\omega < \omega_1$  в среде возбуждается лишь ближнее поле, экспоненциально спадающее в направлении, перпендикулярном к плоскости П. Излучение звука демпфирует колебания П. и смещает её собств. частоты.

Волновые явления в П. учитываются при определении звукоизоляции и звуковой прозрачности упругих перегородок. Для описания падения звуковой волны через П. вводит коэф. прохождения плоской волны через П., равный отношению амплитуды прошедшей и па-



дающей волн. Для нормально падающей волны полное прощрача П. толщиной  $2h = \lambda c_1/c_2$ , где  $\lambda = 1, 2, 3$ . П. толщиной  $2h = \lambda c_1/2a_0$  является согла- дующим элементом между средами с волновыми сопро- тивлениями  $z_1$  и  $z_2$  при условии  $\rho c_1 = V \sqrt{z_1 z_2}$  (случай «прощрачения» границы раздела сред).

Лит.: С р е т т Д ж. В. (Горд Ралея), Теория звука, пер. с англ., 2 изд., т. 1, М., 1955; Т и м о ш е н к о С. П., Пластин- ки и оболочк., пер. с англ., М.—Л., 1948; М о р з Ф., Колебания и звук, пер. с англ., М.—Л., 1949; Б р е х о в- с к и х Л. М., Волны в слоистых средах, 2 изд., М., 1973; В и к т о р о в И. А., Звуковые поверхностные волны в твердых телах, М., 1981; Т и м о ш е н к о С. П., Я н г Д. Х., У ч и н е р у., Колебания в инженерном деле, пер. с англ., М., 1985.

С. В. Е е р о в.

**ПЛАСТИЧЕСКИЙ ШАРНИР** (шарнир текучести) — высеченная балка, полностью находящаяся в пластич. состоянии. Понятие «П. ш.» приобрело большое значение в связи с исследованием несущей способности стержневых и рамных конструкций. П. ш. возникает в набл. напряжённых сечениях; напр., если шарнирно опёртая балка (рис.) находится под действием сосредоточенной силы  $Q$ , то при увеличении этой силы наибольший изгибающий момент возникает в точке, где образуется П. ш. Появление П. ш. уменьшает степень статич. неопределённости конструкции и может сделать её статически определяемой или даже геометрически изменяемой.

Дальнейшее обобщение понятия П. ш. — цилиндр, шарнир текучести, образующий прямую или кривую линию на поверхности пластики или оболочки.

Лит.: Е р х о в М. И., Теория идеальной пластических тел и конструкций, М., 1978; Работин Ю. И., Механика деформируемого твёрдого тела, 2 изд., М., 1988. Д. Д. И л а в.

**ПЛАСТИЧЕСКИИ ТЕОРИИ** математическая — наука о пластич. деформированиях тел. П. т. занимается построением матем. моделей пластич. тел, методами определения напряжений и деформаций в пластически деформируемых телах. За исходные положения П. т. принимаются эксперим. данные, и непосредственно она не связана с физ. объяснением свойств *пластичности*. Совр. П. т. в основном связана со свойствами металлов; её применения возможны к таким материалам, как горные породы, лёд и т. д.

Осн. эксперименты по определению пластич. свойств металлов проводятся при испытании на растяжение — сжатие плоского или цилиндрич. образца при одностороннем деформировании тонкостенной цилиндрич. трубки, находящейся под действием растягивающей силы, крутящего момента и внутр. давления. На диаграмме напряжение — деформация (рис. 1) при одностороннем растяжении образца мягкой малуглеродистой стали до точки А деформация является упругими (линейный участок).

Точка А соответствует пределу пропорциональности материала, т. е. макс. напряжению, при к-ром ещё справедлив *Гука закон*. Набл. напряжение, к-рое может выдержать данный материал, не обнаруживая остаточных деформаций при разгрузке, наз. пределом упругости, или пределом пластичности; он не совпадает с пределом пропорциональности, но обычно их различие в П. т. пренебрегают. После точки А диаграмма становится криволинейной, а на отрезке ВС она имеет горизонтальную площадку, наз. площадкой текучести. Точка В соответствует пределу те-

кучести материала. На площадке текучести деформация возрастает без увеличения напряжений. Начиная с точки С кривая вновь идёт вверх. Если снять нагрузку, то диаграмма разгрузки оказывается прямой  $MP$ , параллельной прямой упругого участка. Полная деформация  $\epsilon$ , соответствующая точке М, состоит из двух частей — упругой  $\epsilon^e$  и пластической  $\epsilon^p$ :

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (\epsilon = ON, \quad \epsilon^e = PN, \quad \epsilon^p = OP). \quad (1)$$

Вторичное приложение растягивающих усилий сопровождается упругим деформированием до достижения растягивающими напряжениями значений, имеющих место в нач. момент разгрузки (прямая  $PM$ ), т. о., вторичный вывод материала в пластич. область высечает предел упругости. Это явление наз. у п р о ч е н и е м п л и н а к л ё н о м. При сжатии диаграмма напряжения — деформация подобна диаграмме растяжения. Однако наклён материала при растяжении повышает предел упругости при сжатии (т. н. *Баушингера эффект*). При пластич. деформировании возникает анизотропия механич. свойств в разных направлениях и эффект Баушингера — следствие приобретённой пластич. анизотропии.

Эксперименты показывают разнообразие в поведении металлов и др. твёрдых тел при пластич. деформировании. Существенным оказывается влияние скорости нагружения. При повышенной темп-ре (а в нек-рых случаях при комнатной темп-ре) твёрдые тела обнаруживают свойства полужидкости и др. последствия. П. т. идеализирует сложное поведение реальных материалов; для разл. областей применения используются разл. модели пластич. тел. Обычно в П. т. диаграмму напряжения — деформация аппроксимируют схемой (рис. 2),

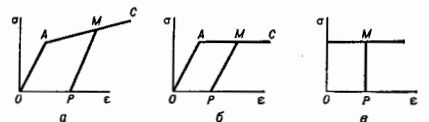


Рис. 2. Идеализированные схемы зависимости  $\sigma - \epsilon$ : а — упруго-пластический материал с линейным упругим участком; б — идеальный упруго-пластический материал; в — идеальный жесткопластический материал.

состоящей из двух участков: отрезка  $OA$ , соответствующего упругому состоянию материала, и отрезка  $AC$ , соответствующего состоянию пластичности. Широко используется схема *жесткопластического тела*, где упругими деформациями пренебрегают по сравнению с пластическими (рис. 2, в). Выбор модели пластич. тела состоит в установлении связи между тензорами, определяющими напряжённое и деформиров. состояние материала.

При пластич. деформировании напряжений и деформиров. состояния материала зависят от последовательности нагружения. Данному напряжённому состоянию могут соответствовать различные пластич. деформации в зависимости от того, какой последовательностью образных состояний оно достигнуто.

Теория пластического течения. В теории пластич. течения устанавливается связь между тензором напряжений  $\sigma_{ij}$  и тензором приращений пластич. деформации  $d\epsilon_{ij}$  (или тензором скоростей пластич. деформаций  $\dot{\epsilon}_{ij}$ ). Приращение полной деформации равно сумме приращений упругой и пластич. деформации  $d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p$ . Предполагается, что упругая часть деформации  $\epsilon_{ij}^e$  связана с напряженным законом Гука. Теория пластич. течения характеризуется неголономным видом связи между напряжениями и деформациями. Термин «течение» в П. т. имеет смысл, отличный от течения, напр., вязких жидкостей: соотношения теор-

Точка А соответствует пределу пропорциональности материала, т. е. макс. напряжению, при к-ром ещё справедлив *Гука закон*. Набл. напряжение, к-рое может выдержать данный материал, не обнаруживая остаточных деформаций при разгрузке, наз. пределом упругости, или пределом пластичности; он не совпадает с пределом пропорциональности, но обычно их различие в П. т. пренебрегают. После точки А диаграмма становится криволинейной, а на отрезке ВС она имеет горизонтальную площадку, наз. площадкой текучести. Точка В соответствует пределу те-

рий пластич. течения не зависит от времени и при фиксиров. нагрузках изменение деформирования пластич. тел не происходит (в противном случае имеет место *ползучесть материала*).

В П. т. используется понятие пространства напряжений. В шестимерном пространстве напряжений П декартовы координаты соответствуют компонентам тензора напряжений  $\sigma_{ij}$ . Любому напряжённому состоянию в пространстве П соответствует вектор напряжения  $\sigma$  с компонентами  $\sigma_{ij}$ . В пространстве П определяется поверхность нагружения  $\Sigma$ , ограничивающая все упругие состояния данного элемента тела (т. е. все состояния, к-рые могут быть достигнуты из начального без приобретения остаточных деформаций). Напряжённые состояния, соответствующие точкам поверхности нагружения  $\Sigma$ , соответствуют пределам текучести при сложном напряжённом состоянии. При изменении напряжённого состояния поверхность нагружения изменяет свою форму.

Из опыта известно, что материал, находящийся в любом напряжённом состоянии, можно деформировать, не сообщая ему остаточных деформаций (упругая разгрузка). Поэтому поверхность  $\Sigma$  при изменении своей формы меняется так, что всё время проходит через конец вектора напряжений  $\sigma$ . Если для некоторого материала напряжённые состояния меняются от  $\sigma_1$  до  $\sigma_2$  (рис. 3), то поверхность нагружения занимает соответ-

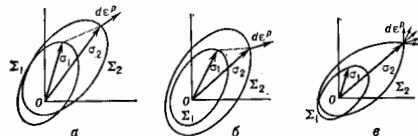


Рис. 3. Изменение поверхности нагружения при изменении напряжённого состояния от  $\sigma_1$  до  $\sigma_2$ ; а и б — поверхности нагружения остаются гладкими;  $d\epsilon^p$  — вектор приращения пластич. деформации (ортогональный к поверхности нагружения, согласно ассоциированному закону); в — поверхность нагружения приобретает угловую точку, стрелки ограничивают возможные направления вектора приращения пластической деформации (согласно обобщённому ассоциированному закону пластического течения).

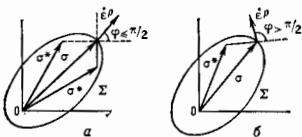


Рис. 4. а — вектор  $\dot{\epsilon}^p$  ортогонален к поверхности нагружения; для любых  $\sigma^*$  неравенство Мизеса выполняется; угол между векторами  $\sigma - \sigma^*$  и  $\dot{\epsilon}^p$  меньше или равен  $\pi/2$ ; б — вектор  $\dot{\epsilon}^p$  неортогонален к поверхности нагружения. Найдётся такое  $\sigma^*$ , при котором неравенство Мизеса не выполняется; угол между векторами  $\sigma - \sigma^*$  и  $\dot{\epsilon}^p$  больше  $\pi/2$ .

ственно положения  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$ . При изменении поверхности нагружения так, как показано на рис. 3(а), увеличение предела текучести в одном направлении приводит к понижению его в противоположном направлении. Если поверхность  $\Sigma_2$  включает в себя поверхность  $\Sigma_1$  (рис. 3(б)), то пределы текучести увеличиваются во всех направлениях. При этом поверхность  $\Sigma_2$  может оставаться гладкой (рис. 3,а,б) или приобретать угл. точку.

Аналитич. выражение поверхности нагружения можно записать в виде  $f = 0$ . Ф-ция  $f$  наз. ф-цией нагружения и может зависеть от компонент напряжений, пластич. деформаций, разл. параметров, связанных с процессами нагружения неголомными дифферен-

циальными или функциональными соотношениями, и др.

Соотношения связи  $d\epsilon_{ij}^p - \sigma_{ij}$  формулируются обычно на основе принципа (постулата) максимума Мизеса: для фиксиров. точки поверхности  $\Sigma$  и действит. компонент скорости пластич. деформации  $\dot{\epsilon}_{ij}$  имеет место неравенство  $\sigma_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}^p \geq \sigma_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}$ , где  $\sigma_{ij}$  — компоненты действительного напряжённого состояния, а  $\sigma_{ij}^*$  — компоненты любого возможного напряжённого состояния, т. е. лежащего внутри или на поверхности  $\Sigma$ . Из принципа Мизеса следуют невозможность поверхности нагружения и ассоцииров. закон течения, определяющий ортогональность вектора  $\dot{\epsilon}^p(\dot{\epsilon}_{ij}^p)$  и поверхности  $\Sigma$  (рис. 4).

Аналитич. выражение связи  $d\epsilon_{ij}^p - \sigma_{ij}$ , определяемое ассоцииров. законом пластич. течения, имеет вид

$$d\epsilon_{ij}^p = h \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij}, \quad (2)$$

где  $f$  — ф-ция нагружения, к-рая в этом случае наз. пластическим потенциалом. Для поверхности нагружения с особенностями (угл. точки, рёбра и т. п.) имеет место теория обобщённого пластич. потенциала и обобщённого ассоцииров. закона течения.

В основу построения П. т. наряду с определением ф-ций нагружения и принципом Мизеса, согласно которому варьируются компоненты напряжения (статич. подход), возможно построение П. т., исходящее из определения диссипативной ф-ции  $D(\dot{\epsilon}_{ij}^p) = \sigma_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}^p$  и принципа Овсагера, при к-ром варьируются компоненты скорости пластич. деформации (кинематич. подход). Оба подхода построения П. т. эквивалентны.

Теория идеальной пластичности. В П. т. наиб. развита теория идеальной пластичности. Для идеального пластич. тела поверхность нагружения  $\Sigma$  фиксирована, в этом случае  $\Sigma$  наз. поверхностью пластичности или текучести. Упр-ные поверхности пластичности (текучести) имеет вид  $f(\sigma_{ij}) = 0$  и наз. условием пластичности (текучести). Соотношение плоской задачи теории идеальной пластичности даны А. Сен-Венаном (А. Saint-Venant, 1871), использовавшим условие пластичности макс. касательного напряжения:  $\tau_{\max} = k$ , где  $k$  — константа материала. В этом случае

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0; \quad (3)$$

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2; \quad (4)$$

$$\frac{\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{\dot{\epsilon}_{xy}}{\tau_{xy}}, \quad \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y = 0; \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad (6)$$

где (3) — ур-ния равновесия; (4) — условие пластичности; (5) — условие изотропии, утверждающее совпадение гл. осей тензоров напряжений и скоростей пластич. деформаций; условие несжимаемости; (6) — ф-лы Коши, связывающие компоненты скорости деформации с компонентами скорости перемещений  $u, v$ . Характерной особенностью является замкнутость системы трёх ур-ний (3 и 4) относительно трёх неизвестных компонент напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ . В этом смысле задача является статически определённой. Ур-ния (3 и 4) принадлежат к гиперболич. типу, ортогональные характеристики совпадают с линиями скольжения (линии разрыва скоростей перемещений), наблюдаемыми экспериментально.

В теории идеальной пластичности наряду с условием макс. касательного напряжения используются разл. условия пластичности.

Построение теории идеальной пластичности в общем случае с единым матем. аппаратом (ур-ния гиперболич.

типа) имеет место при использовании условия пластичности макс. касательного напряжения и обобщённого ассоциированного закона пластич. течения.

Для ребра призмы Треска, интегрирующей в пространстве напряжений *пластичности условие* Треска, имеет место выражение

$$(\sigma_x - \sigma \pm z/3k)\tau_{yz} = \tau_{xy}\tau_{xz}. \quad (7)$$

Система шести ур-ний: трёх ур-ний равновесия и трёх ур-ний (7) [недостающие два получаются из (7) круговой переставкой индексов (x y z)] относительно шести неизвестных компонент напряжений  $\sigma_{ij}$ , как и в плоском случае, является статически определяемой.

Согласно теории обобщённого пластич. потенциала, любое деформиров. состояние может соответствовать ребру призмы Треска.

На основе модели *идеально-пластического тела* развиты теории технол. задач обработки металлов давлением, несущей способности конструкций оптимального протравливания, приспособляемости, динамики упругопластич. и жёсткопластич. тела и др.

Модели пластических сред. Обобщением теории идеальной пластичности для упрочняющегося материала является теория трансляц. упрочнения (А. Ю. Ишлинский), согласно к-рой происходит смещение поверхности пластичности как твёрдого целого в пространстве напряжений в зависимости от роста пластич. деформации:

$$(\sigma_{ij} - c\epsilon_{ij}^p)(\sigma_{ij} - c\epsilon_{ij}^p) = 6k^2 \quad (k, c = \text{const}). \quad (8)$$

Компоненты  $S_{ij} = c\epsilon_{ij}^p$  в (8) могут интерпретироваться как внутр. упругие микронапряжения. Теория трансляц. упрочнения описывает эффекты приобретённой анизотропии и связанный с ней эффект Баушингера.

Существуют разн. подходы к описанию поведения упрочняющихся пластич. тел. Теории скользящих рассматривают материал как поликристаллич. агрегат с равновероятным распределением форм и размеров зёрен в элементарном объёме тела, в к-ром выделяется преимуществ. линия скользящих. Вклад от поверхности скользящих в пластич. деформирование определяется в нек-рой интегральной форме. Подобные теории могут быть описаны в рамках теории обобщённого пластич. потенциала.

Деформационные теории пластичности. При активном простом (пропорциональном) нагружении соотношения теории малых упругопластич. деформаций (А. А. Ильюшин, 1943) имеют вид

$$\sigma_x - \sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\epsilon_u} (\epsilon_x - \epsilon), \quad \tau_{xy} = \frac{\sigma_u}{\epsilon_u} \epsilon_{xy}; \quad (9)$$

$$\sigma_u = \Phi(\epsilon_u), \quad \sigma = 3K\epsilon, \quad K_x = \text{const}, \quad (10)$$

где

$$\sigma_u = \sigma_{ij}/3, \quad \epsilon = \epsilon_{ij}/3, \quad \sigma_u = (\sigma_{ij}\sigma_{ij})^{1/2},$$

$$\epsilon_u = (\epsilon_{ij}\epsilon_{ij})^{1/2}, \quad \sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma,$$

$$\epsilon'_{ij} = \epsilon_{ij} - \delta_{ij}\epsilon.$$

Согласно (9), векторы *девиаторов напряжений* и *девиаторов деформаций* коллинеарны. Соотношения (10) определяют функциональную зависимость модулей этих векторов, пропорциональность изменения объёма среднему давлению.

Сравнит. простота соотношений теории малых упругопластич. деформаций позволила получить ряд важных результатов при расчётах на прочность и устойчивость деталей конструкций (труб, стержней, пластин, оболочек), дать методы определения динамики напряжений при продольном ударе стержней и т. д.

Теория упругопластических процессов. В теории сложного непростого, непропорционального нагружения (Ильюшин) аналогично пространству напряжений

вводится пятимерное пространство девиатор деформаций  $\epsilon'_{ij}$ . В процессе деформирования вектор девиатора деформации описывает кривую, наз. траекторией деформации, внутр. геометрия к-рой описывается четырьмя кривизнами  $k_i$ , определяющими т. н. репер Френе, и пятью единичными векторами  $r_i$ .

Параметрами, характеризующими процесс деформации, являются: ориентация траектории, её внутр. геометрия (кривизна), скорость деформации, др. механич. и термодинамич. параметры, заданные как ф-ция длины дуги. Вектор напряжений  $\sigma$  определяется модулем  $|\sigma| = \sigma_u$  и углами ориентации  $\theta_k$ :

$$\sigma = \sigma_u \sum_{k=1}^4 p_k \cos \theta_k. \quad (11)$$

Для определения соотношений связи (11) устанавливаются зависимости величин  $\sigma_u, \theta_i$  (где  $i = 1, \dots, 5$ ) от параметров произвольного процесса деформации.

Согласно постулату изотропии, для изотропного материала модуль вектора напряжений и углы его ориентации в репере Френе однозначно определяются изменением параметров процесса от его начала до текущего момента, т. е. они являются функциями *апола*, порождёнными ф-циями  $k_i$  и др. параметров. Полное определение функционало. пластичности по данным опыта чрезвычайно затруднительно, и пока предложены способы построения лишь части из них.

Другое свойство пластичности изотропного материала отражает принцип заглаживания: значения углов ориентации вектора напряжений в репере Френе зависят от изменения кривизны не на всей предшествующей траектории деформации, а на последней её части, длина к-рой, характерная для данного материала, наз. следом заглаживания. Это свойство позволило выделить нек. типы процессов (простой деформации, малой кривизны и т. п.), для к-рых соотношения между напряжениями и упругопластич. деформациями устанавливаются конкретно и не содержат *функционалов*.

Идеи теории упругопластич. процессов реализуются в т. н. эндохронных теориях, использующих зависимость напряжения — деформации в виде функционала.

Лит.: Соколовский В. В., Теория пластичности, 3 изд., М., 1969; Прагер В., Ходж Ф., Теория идеальной пластичности, пер. с англ., М., 1958; Хилл Р., Математическая теория пластичности, пер. с англ., М., 1956; Ильяшин А. А., Новожилков В. В., Теория пластичности, учитывающая остаточные микронапряжения, «ИММ», 1958, т. 22, с. 78; Ильяшин А. А., Пластичность. Основы общей математической теории, М., 1963; Ильяшин А. А., Биковцев Г. И., Теория упрочняющегося пластического тела, М., 1971; Ревуцкий А. Ф., Чанышев А. И., Шемляк и Е. И., Математическая модель упругопластических тел, в сб.: Актуальные проблемы вычислительной математики и математического моделирования, Новосибир., 1985. Д. Д. Исаев.

**ПЛАСТИЧНОСТИ УСЛОВИЕ** (текущее условие) — соотношение матем. пластичности теории, определяющее границу, отделяющую область пластического (точнее, упругопластического) состояния материала от области его упругого состояния. При выплнении П. у. в материале начинают возникать остаточные деформации. П. у. записывается в виде  $f(\sigma_{ij}) = 0$ , где  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжений. Для изотропного тела П. у. — ф-ция инвариантов тензора напряжений.

Установление П. у. — одна из осн. задач экстрем. работ, посвящённых феноменологии теории пластичности. При экстрем. определении П. у. изучается однородное напряжённое состояние (состояние, при к-ром напряжения и деформации одинаковы во всех точках тела), и-рое реализуется в ср. части растягиваемых круглых или плоских образцов, а также при деформировании тонкостенных трубок, находящихся под действием растягивающей силы  $P$ , внутр. давления  $p$  и крутящего момента  $M$  (рис. 1). В др. случаях (плоское деформиров. состояние, пространственное напряжённое состояние и др.) П. у. подтверждается лишь косвенно при сравнении теоретич. и экстрем. значений П. у.,

полученных при нагружении и разгрузке неоднородно напряжённых пластич. тел.

Для металлов наиболее применимы П. у. Треска (Н. Треска, 1864) и Мизеса (R. Mises, 1913). Согласно П. у. Треска, пластич. деформация в точке тела возникает, когда макс. касательное напряжение  $\tau_{\max}$  достигает нек-рого предельного значения  $\tau_{\max} = k = \text{const}$ . Поскольку  $\tau_{\max}$  равно одной из полуосей гл. напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , то П. у. Треска записывается в виде

$$|\sigma_1 - \sigma_2| \leq 2k, \quad |\sigma_2 - \sigma_3| \leq 2k, \quad |\sigma_3 - \sigma_1| \leq 2k. \quad (*)$$

Если за оси координат выбрать  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , то каждая точка этого пространства отвечает определённому напряжённому состоянию точек тела. Все напряжённые состояния точек тела, удовлетворяющие неравенствам (\*), находятся в пространстве гл. напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  внутри нек-рой шестигранной призмы, т. е. призмы Треска (рис. 2). Геом. П. у. Треска утверждает, что пластич. деформация в точке тела возникнет в случае, если напряжённое состояние этой точки будет лежать в пространстве гл. напряжений на призме Треска.



Рис. 1. Схема деформирования тонкостенной трубы.

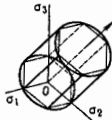


Рис. 2. Призма Треска и цилиндр Мизеса.

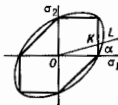
Согласно П. у. Мизеса, пластич. деформация возникает, когда интенсивность касат. напряжений  $\tau_1$  достигает нек-рой пост. величины  $\tau_1 = k = \text{const}$ . П. у. Мизеса записывается через главные напряжения в виде

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2$$

и изображается в пространстве гл. напряжений цилиндром Мизеса, описанным около призмы Треска.

Оба П. у. — Треска и Мизеса — дают мало отличающиеся результаты, т. е. их отношение заключено в близких пределах  $0,816 \leq \tau_1/\tau_{\max} \leq 0,941$ . В конкретных случаях обычно выбирают тем из них, к-рое упрощает матем. решение задач. Различие между П. у. Треска и Мизеса может быть наглядно продемонстрировано на примере плоского напряжённого состояния (одно из гл. напряжений равно нулю), когда П. у. Треска и Мизеса изображаются соответственно шестугольником и эллисом (рис. 3).

Рис. 3. Шестугольник Треска и эллипс Мизеса для плоской задачи. При пропорциональном нагружении  $\sigma_2/\sigma_1 = \lambda, \lambda = \text{const}$ ; напряжённое состояние изображается точками прямой  $OL$ ; равнина в условиях пластичности Треска и Мизеса изображается отрезком  $KL$ .



П. у. может быть рассмотрено в качестве пластич. потенциала. В этом случае П. у. определяет, согласно ассоциирован. закону пластич. течения (см. Пластичности теории), связь между компонентами приращений деформации и напряжениями.

Лит.: Соколовский В. В., Теория пластичности, 2 изд., М., 1969; Ивашкин Л. А., Пластичность, ч. 1, М. — Л., 1948; Работнов Ю. П., Механика деформируемого твёрдого тела, 2 изд., М., 1988. Д. Д. Исаев.

**ПЛАСТИЧНОСТЬ** — свойство твёрдых тел необратимо деформироваться под действием механич. нагрузок. Отсутствие или незначит. П. наз. *хрупкостью*. Пластич. деформации испытывают детали конструкций и сооружений, заготовки при обработке давлением (прокатке, штамповке и т. п.), пласти земной коры и др. объекты. Учёт П. позволяет определять запасы прочности, деформируемости и устойчивости, расширять возможности создания конструкций мин.

веса. В ряде совр. конструкций П. обеспечивает их наиб. рациональное функционирование, надёжность и безопасность, снижает *концентрацию напряжений* и поэтому повышает сопротивляемость тел ударным и усталостным нагрузкам.

При растяжении цилиндрич. образца (одноосное напряжённое состояние) обнаруживают предел упругости  $\sigma_y$ ; при напряжениях  $\sigma \leq \sigma_y$  деформация е обратима (упругая) и связана с  $\sigma$  Гюка законом  $\sigma_y = E\epsilon$  ( $E$  — модуль Юнга). При дальнейшем увеличении растягивающей силы связь между  $\sigma$  и  $\epsilon$  становится нелинейной и необратимой (рис.). Возрастание  $\sigma$  с увеличением ваз. деформат.

упрочением. При разгрузке от напряжения  $\sigma > \sigma_y$  (точка М) зависимость  $\sigma$  от  $\epsilon$  изображается прибл. прямолинейным отрезком MN, параллельным нач. участку упругости OA. Часть деформации  $\epsilon^e = NM_1 = \sigma/E$  — упругая (обратимая). Отрезок  $\epsilon^p = ON$  — остаточная, или пластич. деформация, к-рая неизменна при разгрузке и возрастает при непрерывном нагружении OAB и при повторной нагрузке после достижения напряжения  $\sigma$ , с к-рого была проведена разгрузка.



График зависимости напряжения — деформация.

При одноосном растяжении П. материала оценивается величиной удлинения, измеренной в момент разрушения. При растяжении пластичных материалов разрушение цилиндрич. образца предшествует потере устойчивости — равномерные удлинения и уменьшение поперечного сечения сменяются образованием т. в. шейки, к-рая представляет собой деформацию относительно небольшого участка образца. Такая локальная деформация оценивается величиной относит. уменьшения сечения  $\psi = (\psi_0 - \psi_k)/\psi_0$  ( $\psi_0$  — нач. сечение образца,  $\psi_k$  — сечение образца в шейке в момент разрушения).

Наступление потери устойчивости материала зависит от чувствительности напряжения пластич. течения материала к скорости деформирования. При сложном напряжённом состоянии пластич. деформация появляется впервые, когда становится  $\sigma_{ij} \geq \sigma_y$  (где  $\sigma_{ij}$  — интенсивность напряжений), т. е. в условиях Генки — Мизеса, или когда наибольшее касат. напряжение  $\tau_{\max} \geq \tau_y$  (где  $\tau_y$  — предел упругости при сдвиге) — условия Треска — Сен-Венана. При этом тензор деформации  $\epsilon_{ij}^e = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p$ , где тензор упругой деформации  $\epsilon_{ij}^e$  связан с напряжениями обобщённым законом Гюка, а тензор пластич. деформации  $\epsilon_{ij}^p$  характеризует деформацию, к-рая сохраняется в окрестности рассматриваемой точки, когда все компоненты тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  при разгрузке обращаются в нуль.

Типичной является неоднозначность зависимости между напряжениями и упругопластич. деформациями: значения напряжений зависят не от текущих (мгновенных) значений деформации, а от того, в какой последовательности пло их изменение до достижения текущих значений, т. е. от процесса деформации. П. зависит от свойств материала — от характера межатоомных связей, хим. и фазового состава, кристаллич. структуры и микроструктуры, а также условий деформирования — тем-ры, величин и схемы приложенных сил (напряжённого состояния), скорости их приложения. П. не является физ. или механич. константой материала, а отражает его состояние. Для оценки П. материалов в конкретных условиях обработки давлением (прокатка, ковка, штамповка, прессование и др.) пользуются различными техн. пробями (число оборотов до разрушения при скручивании; угол загиба и кол-во перегибов; глубина погружения стандартного шарика в листовую материал —

проба Эриксона; ударная вязкость и др.). Связь между такими пробями и характеристиками, к-рые получают при стандартных механич. испытаниях, найти не всегда просто.

Лит.: В е р и т ш е й н М. П., З а й м о в с к и й В. А., Механические свойства металлов, 2 изд., М., 1979; П о л у х и н П. И., Г о р е л и к С. С., В о р о н ц о в В. К., Физические основы пластической деформации, М., 1982; К а в б и ц и в О. А., Сверхпластичность промышленных сплавов, М., 1984.

В. М. Розенберг.

**ПЛАСТИЧНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ** — свойство кристаллич. твёрдых тел необратимо менять свои размеры и форму в поле механич. напряжений. Повитие П. к. многозначно, оно включает в себя силовые и геом. характеристики. Основой является величина предельной деформации до разрушения  $\epsilon_k$ . Если  $\epsilon_k$  велика, кристалл считается высокопластичным (вязким), если мала — малопластичным (хрупким, ломким). При данном  $\epsilon_k$  свойства П. к. усиливаются с уменьшением деформирующего напряжения: чем оно меньше, тем легче осуществляется необратимое формоизменение кристалла, тем более он пластичен.

П. к. определяется микромеханизмами элементарных актов пластич. деформации и упрочнения, а также закономерностями эволюции дефектной структуры в ходе продолжающегося нагружения. Обычно в кристаллах одновременно действуют неск. микромеханизмов пластич. деформации. Вклад их неравноценен и в зависимости от того, какой из них преобладает, П. к. подразделяют на дислокационную, деформ. двойникования, пластичность ирреверсаии, межзёрненую, диффузионную и краудоновую.

Дислокационная пластичность — наиб. распространённый и типичный вид пластичности кристаллич. твёрдых тел в широком диапазоне температурно-скоростных и силовых режимов нагружения. Осуществляется посредством зарождения и перемещения дислокаций (рис. 1). При низких и умеренных тем-рах дислока-



Рис. 1. Однородное распределение дислокаций на ранних стадиях пластической деформации.

ции скользят вдоль плотноупакованных атомных плоскостей, сдвигая при этом соприкасающиеся части кристалла за вектор Бюргера  $b$ . Макроскопич. формоизменение кристалла происходит вследствие наложения множества подобных микросдвигов, так что тензор скорости пластич. деформации равен

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2} \sum_p (\rho v)_p (nb + bn),$$

где  $\rho$  — плотность подвижных дислокаций,  $v$  — их скорость,  $n$  — нормаль к плоскости скольжения,  $p$  — номер действующей системы скольжения. Подвижность дислокаций в диапазоне скоростей, много меньших скорости звука, резко зависит от действующих на них сил, в результате чего из всех возможных кристаллографически эквивалентных систем скольжения реальный вклад в пластич. деформацию дают те, у к-рых максимальны приведенные сдвиговые напряжения. Дислокац. П. к. обладает ярко выраженной анизотропией. Деформирующее напряжение, предельная деформация до разрушения и др. её характеристики существенно

зависят от ориентации кристаллич. решётки относительно гл. осей тензора напряжений  $\sigma$ .

Скорость движения дислокации определяется скоростью термически активируемых атомных перестроек, происходящих в её ядре и направляемых полем  $\sigma$ . По этой причине дислокац. П. к. чувствительна к типу межатомной связи. Чем слабее выражена её ковалентная составляющая, чем меньше локализованы электронные незаполненные оболочки, тем легче совершаются атомные перестройки, тем выше П. к. Наиболее пластичны металлы, наименее — ковалентные кристаллы. Кристаллы с ионной межатомной связью занимают промежуточное положение. Значит, роль играют и величина энергии связи кристалла и характер связи. Увеличение энергии связи затрудняет протекание термически активируемых процессов, снижает дислокац. П. к.

**Симметрия кристалла** и его атомная упаковка определяют кол-во и распределение систем скольжения, возможные варианты расщепления дислокаций, строение их ядра, величину вектора Бюргера и др. параметров, от к-рых зависит П. к. Кристаллы кубич. симгонии наиб. пластичны. Переход к средним и низким категориям симметрии, равно как и усложнение элементарной ячейки, увеличение в её базе числа и типов атомов, появление сверхструктур коррелируют со снижением показателей П. к. В том же направлении действуют уменьшение плотности упаковок. Напр., переход от гранецентрированной к объёмноцентриров. модификации кубич. кристаллов сопровождается радикальным изменением их пластичности в низкотемпературной области. Для металлов с гранецентрированной кубич. (ГЦК) решёткой типична слабая температурная зависимость П. к. (рис. 2). В интервале гомологич. тем-р  $0,01 \leq \theta \leq T/T_m \leq 0,5$  предельная деформация до разрушения  $\epsilon_k$  слегка увеличивается, а предел текучести  $\sigma_T$  падает ( $T_m$  — тем-ра плавления). У металлов



Рис. 2. Схематическое изображение зависимости от гомологической температуры  $\theta$  предельной деформации  $\epsilon_k$ , предела текучести дислокационной пластичности  $\sigma_T$  и пластичности деформационного двойникования  $\sigma^d$  для кристаллов с ОЦК (сплошная линия) и ГЦК (штриховая линия) решётками.

с объёмноцентрированной кубич. (ОЦК) решёткой характеристики пластичности ведут себя иначе. Плавное изменение  $\epsilon_k$  и  $\sigma_T$  наблюдается у них только при  $\theta \geq 0,2$ . В области низких тем-р предел текучести с уменьшением  $\theta$  резко возрастает, а предельная деформация до разрушения падает практически до нуля. Такое изменение механич. свойств кристаллов с ОЦК решёткой наз. в вязко-хрупким переходом; он происходит в узком интервале гомологич. тем-р  $0,1 \leq \theta \leq 0,2$  и сопровождается значит. уменьшением энергоёмкости разрушения и сменой микромеханизмов разрушения. В вязком состоянии металлы с ОЦК решёткой разрушаются также же, как и с ГЦК решёткой, — за счёт зарождения, пластич. подрастания и объединения микропор. Это приводит к формированию на поверхности расширяющейся макротрещины характерной микрофотографии рельефа, т. н. чашечного излома (рис. 3). В хрупком состоянии металлы с ОЦК решёткой разрушаются сколом, за счёт отрыва по плоскости спайности (рис. 4). Явление хладноломкости металлов с ОЦК решёткой имеет большое практич. значение, поскольку может оказаться причиной катастрофич. разрушений при повышении тем-ры эксплуатации. Это необходимо учитывать при проектировании изде-

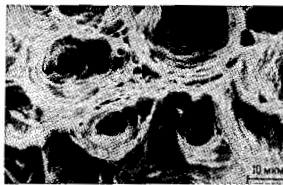


Рис. 3. Микрофотография поверхности излома кристалла молибдена при вязком разрушении.

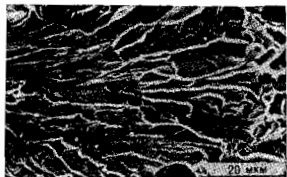


Рис. 4. Микрофотография поверхности излома кристалла железа при хрупком разрушении.

лий из металлов с ОЦК решёткой, работающих в интервале темп-р вязко-хрупкого перехода.

Пластичность деформационного двойниковогоания. В тех случаях, когда подвижность дислокаций затруднена, пластич. формоизменение кристалла может реализовываться посредством деформ. двойниковогоания. Под действием напряжений в нём возникают и развиваются двойники деформации — замкнутые, испытывающие значит. формоизменение микробъёмы, кристаллич. решётка к-рой по отношению к матрице имеет двойниковую сопряжённую ориентацию. Механизм роста деформ. двойников заключается в последоват. прохождении частичных дислокаций с одним и тем же вектором Бюргерса вдоль атомных плоскостей, параллельных кристаллографической выделенной плоскости двойниковогоания. Характеристики пластичности двойниковогоаногося кристалла, так же как и при дислокац. П. к., реак. анизотропны.

Деформ. двойниковоание часто встречается у кристаллов средней и нижней категорий симметрии, имеющих сложные многоатомные элементарные ячейки, выражённую ковалентную составляющую межатомной связи. Наблюдается оно и у металлов. В металлах с гексагональной плотнопакетованной решёткой (Гекс. ПУ) деформ. двойниковоание связано с ограниченным набором действующих систем скольжения. Во мн. кристаллах гексагональной симметрии при низких темп-рах векторы Бюргерса дислокаций лежат в плоскости базиса. Такие дислокации не в состоянии осуществить сдвиг материала в направлении, перпендикулярном плоскости базиса. Если же он геометрически необходим, то произвести его может лишь независимая мода деформации, к-рой и является двойниковоание. Даже в пластичных металлах с Гекс. ПУ решёткой, таких, как  $\alpha$  — Ti, двойниковоание наблюдается на самых ранних этапах пластич. деформации (рис. 5).

В металлах с ОЦК решёткой причиной деформ. двойниковогоания является резкая температурная зависимость предела текучести  $\sigma_d$  дислокац. пластичности. При низких темп-рах сопротивление движению дислокаций столь велико, что они оказываются практически неподвижными. Температурная зависимость деформ. двойниковогоания более полого, поэтому всегда существует область темп-р, где оно предпочтительнее (рис. 2).

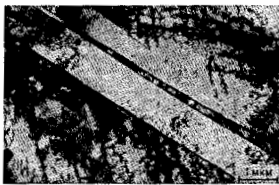


Рис. 5. Двойники деформации  $\alpha$  — Ti при  $\epsilon = 0,1$ .

Характерная темп-ра  $\Theta_d$ , ниже к-рой реализуется деформ. двойниковоание, а выше — дислокац. пластичность, находится в области хрупких состояний металлов с ОЦК решёткой, так что деформ. двойниковоание в них — типичный признак малопластичных материалов.

В металлах с ГЦК решёткой деформ. двойниковоание встречается у материалов с низкой зернистой дефекта упаковки, причём только на поздних стадиях пластич. течения. Причиной его служит монотонно нарастающее упрочнение плоскостей скольжения, при нек-рой деформации  $\epsilon_d$  оно достигает такой величины, при к-рой дальнейшее перемещение дислокаций по ним становится невозможным. Поскольку из-за сильного расщепления ядер выход дислокаций в другую плоскость запрещён, дислокац. П. к. при  $\epsilon > \epsilon_d$  исчезает. На смену ей приходит деформ. двойниковоание.

Пластичность превращения обусловлена тем, что в момент структурного фазового перехода кристаллич. решётка исходной фазы в области, непосредственно прилегающей к межфазной границе, теряет устойчивость и атомы там легко перестраиваются из одной конфигурации в другую под действием внутр. термодинам. стимулов. Пластич. свойства кристалла при этом испытывают скачкообразное изменение: предел текучести аномально снижается, предельная деформация до разрушения увеличивается. Конкретный микромеханизм движения межфазной границы диктуется специфичной природы. При нормальных аллотропич. превращениях — это некоррелиров. диффузионные перестройки, при *мартенситном превращении* — кооперативные (сдвиговые) перемещения больших групп атомов. В последнем случае микробъёмы кристалла претерпевают собств. деформацию превращения, а кристаллич. решётка новой фазы оказывается связанной с решёткой исходной фазы определённым ориент. соотношением. В отсутствие напряжений любой из кристаллографически эквивалентных вариантов ориент. соотношений реализуется с равной вероятностью. В результате макроскопич. объём, включающий в себя много зародившейся новой фазы, в целом превращение не имеет своей формы. В нагруженном кристалле положение иное. Предпочтительными становятся те зародившиеся новой фазы, к-рые отвечают ориент. соотношениям, обеспечивающим лучшее соответствие собственной и вынужденной деформации. Пластичность превращения в таких кристаллах определяется суперпозицией собств. необратимых деформаций превращения всех его микробъёмов. Она тем больше, чем сильнее сказывается ориентирющее влияние приложенных напряжений, чем больше число кристаллографически эквивалентных вариантов превращения, чем значительнее собств. деформация, чем легче соблюдаются условия сопряжения на межфазных границах и границах стыкующихся объёмов новой фазы.

Диффузионная пластичность осуществляется посредством направленной миграции по объёму и поверхности кристалла точечных дефектов кристаллич. решётки — вакансий и межузельных атомов. Те и другие зарож-

даются и аннигилируют на свободных поверхностях, межфазных и межзеренных границах, на дислокациях. Вакансии преим. образуются в растянутых областях, откуда мигрируют в области сжатия. Диффузионный поток межзеренных атомов идёт в обратном направлении. Диффузионная П. к. заметна лишь при высоких гомологич. темп-рах ( $\Theta \geq 0,5$ ). В области низких и умеренных темп-р она проявляется только в спец. условиях, напр. при корпускулярном облучении кристалла, когда в нём возникает большая концентрация неравновесных вакансий и межзеренных атомов. При диффузионной П. к. предел текучести, ирреversible деформация до разрушения, др. пластич. характеристики с высокой степенью точности изотропны и не зависят от ориентации кристаллич. решётки относительно гл. осей тензора напряжений.

Осн. вклад в диффузионную П. к. дают вакансии, т. к. энергия их образования существенно меньше, чем энергия образования межзеренных атомов. Если в узлах решётки располагаются атомы разных сортов, вакансии могут образовывать с нек-рыми из них связанные состояния, комплексы «вакансия — атом», и мигрировать по кристаллу в составе таких комплексов. Этот эффект затрудняет диффузионную П. к., причём в случае образования малоподвижных комплексов очень сильно. Кроме того, он приводит к пространственному перераспределению атомов: те из них, что входят в состав комплексов, сегрегируют на вакансионных стоках, затягиваются в области сжатия, уходят из растянутых областей.

Краудинная пластичность. В резко неоднородных полях больших сжимающих напряжений при низких гомологич. темп-рах в областях высокосовершенной кристаллич. структуры могут возникать динамич. краудинон — одномерные ступени в цепочках атомов, расположенных вдоль плотнотуполованных направлений. Зарождение и распространение их по кристаллу лежит в основе краудинной П. к. Прогресс динамич. краудинон невелик — они эффективно удерживаются даже на незначит. отклонениях атомов из узлов кристаллич. решётки. По этой причине краудинная П. к. охватывает локальные области кристалла. Обычно её наблюдают вблизи места вдавливания индентора в малоэластичных материалах.

Межзеренная пластичность. В поликристаллах, деформируемых в высокотемпературной области ( $\Theta \geq 0,5$ ), при нек-рых скоростях нагружения обнаруживается межзеренная П. к. Она реализуется за счёт проскальзывания зёрен, как целое, по границам сопряжения. Проскальзывание имеет две причины. Первая — интенсификация дислокац. и диффузионной П. к. в узкой приграничной зоне, где скапливаются дислокации, не сумевшие преодолеть границу. Вторая причина связана с явлением дефокализации ядер дислокаций, попавших на границу на объёме зерна. В процессе дефокализации атомная структура дислокац. ядра теряет свою устойчивость и способна в направлении перестройки даже при незначит. сдвиговых напряжениях. Если пластич. деформация идёт с такой скоростью, что на участки границы, охваченной дефокализацией, за характерное время этого процесса попадает одна дислокация из объёма прилегающих зёрен, вся граница становится неустойчивой. Подобный механизм проскальзывания реализуется в условиях структурной сверхпластичности, когда на долю межзеренных сдвигов приходится до 80% общей деформации образца.

Влияние дефектов кристаллического строения на пластичность. П. к. полностью определяется дефектами строения кристаллич. решётки. Подвижные дефекты являются носителями элементарных актов пластич. деформации. Направленное перемещение по кристаллу вакансий, межзеренных атомов, краудинон, дислокаций, двойников и межфазных границ вызывает в нём массперенос, необратимое изменение размеров и фор-

мы. Чем легче происходит движение этих дефектов, тем сильнее влияет на него поле напряжений, тем выше П. к. Роль неподвижных дефектов зависит от вида пластичности. При дислокац. пластичности любые неподвижные дефекты затрудняют протекание пластич. деформации, т. к. в большей или меньшей мере все они тормозят движение дислокаций.

Исходное распределение дефектов полностью определяет предел текучести и особенности нач. стадий пластич. течения кристалла. В дальнейшем влияние исходной структуры ослабевает, поскольку по мере деформирования она постепенно заменяется новой, возникающей в ходе размоножия и перестройки дефектов — носителей пластич. деформации. При дислокац. П. к. закономерно эволюционирует дислокац. структура кристалла. Плотность дислокаций с ростом деформации нарастает вплоть до высоких, порядка  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>, значений. При этом из-за сильного междислокац. взаимодействия в ансамбле дислокаций возникают коллективные формы движения. В случае неоднородного распределения дислокаций коллективные формы движения реализуются в виде пластич. ротаций, заключающихся в поворотах отд. участков кристалла как целого. Структурными носителями пластич. ротаций являются дефекты дислокац. типа — обрванные границы разориентации и стыковые дисклинации. Сдвижением этих дефектов связано развитие ротационной пластичности. Вклад ротационной пластичности в общую П. к. увеличивается с ростом деформации и приводит к фрагментации кристалла — разбиению его на микроскопические (размером 0,2—0,5 мкм) области, разориентировки к-рых  $\omega$  увеличиваются с ростом деформации и примерно по линейному закону

$$\omega = \alpha(\epsilon - \epsilon_0),$$

где  $\epsilon_0$  — величина деформации, с к-рой началась фрагментация кристалла;  $\alpha$  — геом. коэф. ( $0,5 \leq \alpha \leq 1$ );  $\omega$  — в радианах;  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  — истинные логарифмич. деформации. В высокоэластичных материалах разориентировки между фрагментами могут достигать неск. десятков градусов, при этом сами фрагменты очищаются от дислокаций и становятся высокосовершенными монокристаллич. областями (рис. 6). В кристаллах,

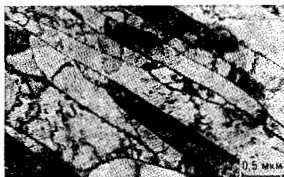


Рис. 6. Фрагментированная структура Мо при  $\epsilon = 1,6$ .

подверженных деформации, двойникованию, фрагментируется не только матрица, но и внутри объёмов двойников, в результате чего структура после больших деформаций представляет собой сложную смесь сильно и неоднородно разорезшированных микрообластей. Явление фрагментации обладает большой общностью. Оно наблюдается независимо от исходной структуры и типа кристаллич. решётки, при любом практически осуществимом упрочняющем состоянии деформируемого кристалла, при разных темп-рах ( $\Theta \leq 0,5$ ) и скоростях нагружения. Единств. условием фрагментации является достижение достаточной величины деформации ( $\epsilon > \epsilon_0$ ). Т. о., поздние стадии дислокац. П. к. всегда развиваются на фоне фрагментации кристалла. Это обуславливает её осн. особенности: пространственную неоднородность и локализацию течения,

выраженную склонность к потере устойчивости в микро- и макрообъемах, в снижении деформирующего напряжения при сверхбольших деформациях, наконец, в формировании текстуры деформации, т. е. в появлении статистически выделенных кристаллографич. ориентаций в ансамбле микрообъемов, на к-рые разбивается деформируемый кристалл.

Закономерности эволюции дислокац. структур в деформируемых кристаллах предопределяют механизмы исчерпания П. к. В нагруженном кристалле одновременно идут процессы активной и аккомодационной пластич. деформации. Первый заключается в перемещении дислокаций под действием внеш. напряжений  $\hat{\sigma}$ . Он сопровождается возникновением и ростом поля внутр. напряжений  $\hat{\sigma}_{\text{вн}}$  в тех микрообъемах, где скапливаются подвижные дислокации. Второй процесс сводится к зарождению и перемещению дислокаций в поле  $\hat{\sigma}_{\text{вн}}$ . Он сопровождается рассасыванием и перераспределением скопившихся дислокаций, снижением уровня  $\hat{\sigma}_{\text{вн}}$ . До тех пор, пока дислокац. структура может легко перестраиваться, уровень внутр. напряжений, создаваемых в ней, существенно не уменьшается и пластич. деформация может продолжаться без нарушения сплошности материала. Однако по мере эволюц. развития структуры её аккомодация, возможности становится всё меньше и меньше, так что на нек-ром этапе деформации скорость накопления внутр. напряжений становится больше, чем скорость их пластич. релаксации. В такой — критич. структуре возникают первые разрывы сплошности. Накопление и слияние их приводит к образованию макротрещины и разрушению образца.

Тип критич. структуры определяется соотношением между скоростью активной ( $\dot{\epsilon}$ ) и аккомодационной ( $\dot{\epsilon}_a$ ) пластич. деформациями. Поскольку  $\dot{\epsilon}_a$  — термически активируемая и структурно-чувствит. величина, тип критич. структуры при заданной  $\dot{\epsilon}$  зависит от тем-ры испытания, вида упругонапряжённого состояния и отчасти исходной структуры. В материалах со слабой температурной зависимостью  $\dot{\epsilon}_a$  (напр., металлы с ГЦК решёткой) критич. структура совпадает с раз-

кому разрушению с образованием чашечного излома (рис. 3).

Понимание природы и микромеханизмов П. к. позволяет построить развёрнутую физ. теорию этого явления, даёт возможность не только качественно, но и количественно описывать разл. его аспекты: предел текучести, деформаци. упрочнение, предельную деформацию, разрабатываемое напряжение, зависимость скорости пластич. деформации от тем-ры и напряжений, разн. стороны морфологич. и кристаллографич. текстур, др. стороны процесса деформирования.

Лит.: Х о и н о м б. Р. Пластичная деформация металлов, пер. с англ., М., 1972; Х и р т Д. ж., П о т е И., Теория дислокаций, [пер. с англ.], М., 1972; О р л о в А. Н., Введение в теорию дефектов в кристаллах, М., 1983; Р ы б н и В. В., Большие пластические деформации и разрушение металлов, М., 1986; Р. В. Рыбин.

**ПЛАТИНА (Platinum), Pt**, — хим. элемент VIII группы периодич. системы элементов Менделеева, ат. номер 78, ат. масса 195,08, входит в платиновую группу *благородных металлов*. Природная Pt — смесь 6 изотопов:  $^{190}\text{Pt}$ ,  $^{192}\text{Pt}$ ,  $^{194}\text{Pt}$ ,  $^{195}\text{Pt}$  и  $^{196}\text{Pt}$ , преобладают  $^{195}\text{Pt}$  (33,8%) и  $^{194}\text{Pt}$  (32,9%), называемые распространяющей  $^{190}\text{Pt}$  (0,01%), обладающей слабой  $\alpha$ -радиоактивностью ( $T_{1/2}$  = 6,9  $\cdot 10^{11}$  лет). Металлич. радиус 0,138 нм, радиус иона  $\text{Pt}^{4+}$  0,064 нм. Электронная конфигурация внеш. оболочек  $5s^2 5p^6 5d^9 6s^1$ . Энергия последоват. ионизации 8,96, 18,54 и 28,5 эВ. Средство к электрону 2,13 эВ. Значение электроотрицательности 1,44.

В свободном виде серебристо-белый пластичный металл с кубич. гранецентрированной кристаллич. структурой, постоянная решетки  $a = 0,320$  нм. Плотн. 21,46 г/см $^3$ ,  $\rho_{\text{пл}}$  = 1772 г/см $^3$ ,  $\rho_{\text{жид}}$  ок. 3900 г/см $^3$ . Уд. теплота плавления  $\approx 20$  кДж/моль, теплота испарения 510 кДж/моль, уд. теплоты сгорания  $c_p$  = 25,8 Дж/(моль  $\cdot$  К). Тем-ра Дебая 235 К. Работа выхода электронов 5,32 эВ. Коэф. линейного теплового расширения (8,92—9,09)  $\cdot 10^{-6}$  К $^{-1}$  (при 283—473 К). Уд. электрич. сопротивление 0,0081 мОм  $\cdot$  м (при 273 К), термич. коэф. электрич. сопротивления 3,223  $\cdot 10^{-6}$  К $^{-1}$  (при 273—373 К). Теплопроводность 79—73 Вт/(м  $\cdot$  К) (при 200—500 К). Твердость по Бринеллю отожжённой Pt. 300 МПа, модуль упругости 147 ГПа, модуль сдвига 72,4 ГПа (при 273 К).

П. чрезвычайно химически инертна, в соединении проявляет степени окисления +2 и +4 и реже +1 и +3. При восстановлении растворов солей П. образуется высокодисперсный порошок со ср. размером частиц 25—40 нм (т. н. платиновая червь), обратимо адсорбирующий значит. кол-во водорода.

П. используют для изготовления лабораторной посуды, ёмкостей для варки оптич. стекла, термометров, термометров сопротивления, электрич. контактов, проволоки для обмотки высокотемпературных печей, мед. инструментов, в качестве катализатора хим. реакций и т. д. Покрытие тонкими слоями П. (платинирование) защищает металлы от коррозии. В качестве радиоакт. индикатора применяют  $^{193}\text{Pt}$  ( $\beta^-$ -радиоактивен,  $T_{1/2}$  = 18,3 ч).

**ПЛЕНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ** — задержка выхода фотонов из оптически толстой системы, обусловленная многократностью актов их поглощения и последующего переизлучения атомами среды.

П. и. относится прежде всего к т. н. резонансному фотоизлучению, частота к-рых совпадает с частотой фотонов, искусаемых при излучательных переходах возбуждённых атомов на наиб. населённый (часто нижайший) энергетич. уровень. С др. стороны, многократное поглощение-переизлучение «одного и того же» фотона (более строго — радиационного возбуждения) может реализовываться лишь при слабом тушении переносимых возбуждений, что ограничивает сверху допустимую концентрацию «тушителей» частиц (напр., в плазменной системе — электронов). В этом предельном случае П. и. играет определяющую роль в *переносе излучения*.

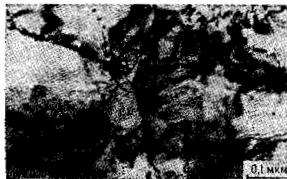


Рис. 7. Зародышевая микротрещина (в кружке) в пластичски деформированном кристалле Мо.

витой фрагментиров. структурой. Поэтому для разрушения их всегда требуется большая пластич. деформация, в ходе к-рой и формируется критич. фрагментиров. структура. В материалах с выраженной температурной зависимостью  $\dot{\epsilon}_a$  (металлы с ОЦК решёткой, ковалентные кристаллы) критич. структура варьирует от исходной (хрупкое разрушение) до хорошо развитой фрагментированной (рис. 6) структуры (вязкое разрушение). Однако даже в случае высокопластичных материалов первые зародышевые микротрещины образуются хрупко. Они имеют характерный вид силовых микротрещин, располагаются в стыках фрагментов и расширяются вдоль их границ (рис. 7). Лишь после достижения нек-рого критич. размера, определяемого температурно-скоростным режимом деформации, зародышевые микротрещины затупляются и превращаются в поры, рост и объединение к-рых приводит к вяз-



Для П. в. обычно характерно длительное по сравнению с пролетным временем «застревание фотона» в атоме, грубо выражаемое неравенством  $t \gg 1/(\chi_{00})$ . Здесь  $t$  — радиан. время жизни атома,  $\chi_{00} \sim n_0 \lambda^2$  — макс. коэф. поглощения резонансного излучения с длиной волны  $\lambda$  в среде невозбуждённых атомов с плотностью  $n_0$ ,  $c$  — скорость света. В этих же обозначениях условие большой оптич. толщины системы имеет вид  $\chi_{00} L \gg 1$ , где  $L$  — характерный размер системы.

Оси. количеств. характеристикой П. в. служит ср. время выхода фотона из системы на её поверхность  $\bar{t} \approx \bar{N}$ , где  $\bar{N}(L)$  — ср. число актов поглощения-перезлучения фотона в ходе его миграции на расстоянии  $L$ .

Конкретный вид зависимости  $\bar{N}(L)$  определяется двумя физ. факторами: а) *уширением спектральной линии*, прежде всего линии поглощения [коэф. поглощения  $\chi(\omega)$ ]; б) *степенью перераспределения частоты фотона*  $\omega \rightarrow \omega'$  в акте его перезлучения возбуждённым атомом.

В формальном пределе неуширенной, монохроматич. линии П. в. приводит к обычной диффузии фотона, описываемой зависимостью  $\bar{N} \sim (\chi_{00} L)^2$  (см. *Диффузия*). Эта диффузионная картина может иметь место и в случае плавения реальной, уширенной линии, а именно в случае недостаточности большого значения  $t$  (напр., в рентг. диапазоне  $t \sim \omega^{-3}$ ), когда перезлучающий атом не успевает «сработать» детали своего предшествующего радиан. возбуждения и благодаря этому поддерживает приближённую монохроматичность ( $\omega' \approx \omega$ ) «рассеяния» фотона.

Более типична, однако, противоположная ситуация, когда уширение линии (зависимость  $\chi(\omega)$ , содержащая и далёкие крылья) сочетается с практически полным перераспределением по частоте в акте перезлучения (полное «забывание» возбуждённым атомом своей предистории). Анализ П. в. для этого важнейшего случая впервые был дан в 1947 независимо Л. М. Бибераманом и Т. Холстейном (Th. Holstein).

И уширение, и перераспределение частоты приводят к существу уменьшенного значения  $\bar{N}(L)$  и ослаблению эффекта П. в. по сравнению с монохроматич. чисто диффузионным пределом.

Так, уширение спектральной линии, напр. за счёт появления створчатой (доплеровской или столкновительной) ширины  $\Gamma$  линии поглощения, обычно значительно превосходящей естеств. ширину  $\nu$ , снижает в  $\Gamma/\nu \gg 1$  раз скорость резонанса в поглощении, приводя к замене видности  $\chi_{00}$  значением коэф. поглощения в центре  $\omega \doteq \omega_0$  уширенной линии:  $\chi(\omega_0) \doteq \chi_0 - \chi_{00}(\Gamma/\nu) \ll \chi_{00}$ .

Перезлучение в условиях полного перераспределения по частоте, приводящее к практич. одинаковости профилей линии поглощения и перезлучения, создаёт такую ситуацию, когда в результирующем потоке фотонов, выходящих в единицу времени за пределы системы, преобладают те наиболее многочисленные (но и наиболее сильно поглощаемые) фотоны из центра линии ( $|\omega - \omega_0| \leq \Gamma$ ), а относительно малочисленные фотоны из далёких крыльев линии ( $|\omega - \omega_0| \gg \Gamma$ ), также, свободный пробег  $k$ -рых  $1/\chi(\omega)$  сравним по порядку величины с размером системы  $L$ .

Статистически типичному «центральному» фотону  $|\omega - \omega_0| \leq \Gamma$  после его поглощения атомом внутри системы для быстрого выхода на поверхность более выгодно не сохранять свою частоту для последующей длит. диффузии, а «промигрировать» по  $\omega$  в такой участье далёкого крыла линии,  $1/\chi(\omega) \sim 1$ , откуда он сможет достичь поверхности «одним прыжком».

В итоге реальная зависимость  $\bar{N}(L)$  оказывается существенно слабее, чем в монохроматич., диффузионном, случае: для доплеровского профиля обеих линий  $\bar{N} \sim \chi_0 L \sqrt{\ln(\chi_0 L)}$ , для лоренцевского —  $\bar{N} \sim \sqrt{\chi_0 L}$ .

При этом в полном потоке выходящих фотонов вклад центрального, «диффузионного», диапазона линии,  $\chi(\omega)L \geq 1$ , и «прострельной» области её далёких крыльев,  $\chi(\omega)L \leq 1$ , относится соответственно как 1:1 в доплеровском и 1:3 в лоренцевском случаях. Т. о., уже в доплеровском случае П. в. носит существенно недиффузионный, а в лоренцевском — в воле «антидиффузионный» характер. Это соответствует и характеру спада интенсивности линии в её крыльях — крутому в доплеровском случае и более пологому — в лоренцевском.

В условиях П. и. поток выходящих фотонов, несмотря на большую оптич. толщину системы  $\chi_0 L \gg 1$ , остаётся пропорциональным её объёму (а не поверхности) вплоть до столь больших значений  $\chi_0 L$ , к-рым соответствует время выхода  $\bar{t}(L)$  порядка ср. времени между двумя тысячами столкновениями (в рассматриваемом случае очень редкими).

Лит.: И в а н о в В. В., Перенос излучения и спектры несвязных тел, М., 1969; Д о л г и н о в А. Э., Г е л и н Ю. Н., С и л я н т с е в Н. А., Распространение и поляризация излучения в космической среде, М., 1973; Б и б е р м а н Л. М., В о р о б е в В. С., Я н к у б о в И. Т., К и н е т и к а н е р а в н о в е с н о й н и з к о т е м п е р а т у р н о й п л а з м ы, М., 1982; А б р а м о в В. А., К о г а н В. И., Л и о с и ц а В. С., Перенос излучения в плазме, в сб. Вопросы теории плазмы, в. 14, под ред. М. А. Леонтовича, Б. В. Клопачева, М., 1982; К л ю ч а р е в А. Н., В с з у г л о в Н. Н., Процессы возбуждения и ионизации атомов при поглощении света, Л., 1983. В. И. К о г а н.

**ПЛЕЧЕНИЕ ЦВЕТА** (конфайнмент) — то же, что *удержание цвета*.

**ПЛЕНКА МАГНИТНАЯ** — см. *Магнитная плёнка*.  
**ПЛЕНЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ** — *магнетострикционный преобразователь* или *пьезоэлектрический преобразователь* в виде тонкой плёнки, к-рой используется для генерации и приёма гиперзвуковых волн в твёрдых телах.

**ПЛЕОХРОИЗМ** (от греч. pleon — больше и chroma — цвет) — различное поглощение веществом проходящего через него света (а следовательно и разл. окрашивания) в зависимости от направления распространения и поляризации этого света. Хотя более правильным является термин «П.», более употребителен термин «дихроизм». Подробнее см. *Дихроизм* и лит. при этой статье.

**ПЛОСКАЯ ВОЛНА** — *волна*, у к-рой направление распространения одинаково во всех точках пространства. Простейший пример — однородная монохроматич. незатухающая П. в.:

$$u(x,t) = A \exp(i\omega t \mp kx), \quad (1)$$

где  $A$  — амплитуда,  $\Phi = \omega t \mp kx$  — фаза,  $\omega = 2\pi/T$  — круговая частота,  $T$  — период колебаний,  $k$  — волновое число. Поверхности постоянной фазы (фазовые фронты)  $\Phi = \text{const}$  П. в. являются плоскостями.

При отсутствии дисперсии, когда фазовая скорость  $v_\Phi$  и групповая скорость  $v_g$  одинаковы и постоянны ( $v_g = v_\Phi = v$ ), существуют стационарные (т. е. перемещающиеся как целое) бегущие П. в., к-рые можно представить в общем виде

$$u(x,t) = f(z \mp vt), \quad (2)$$

где  $f$  — произвольная ф-ция. В нелинейных средах с дисперсией также возможны стационарные бегущие П. в. т.п. (2), но их форма уже не произвольна, а зависит как от параметров системы, так и от характера движения волны. В поглощающих (диссипативных) средах П. в. уменьшают свою амплитуду по мере распространения; при линейном затухании это может быть учтено путём замены в (1)  $k$  на комплексное волновое число  $k_2 \mp ik_m$ , где  $k_m$  — коэф. затухания П. в.

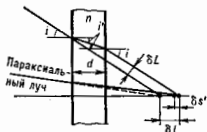
Однородная П. в., занимающая всё бесконечное пространство, является идеализацией, однако любое волновое поле, сосредоточенное в конечной области (напр., направляемое *линиями передачи* или *волноводами*), можно представить как суперпозицию П. в. с тем или иным пространственным спектром  $k$ . При этом волна

может по-прежнему иметь плоский фазовый фронт, но неоднородное распределение амплитуды. Такие П. в. наз. плоскими неоднородными волнами. Отд. участки сферич. или цилиндрич. волн, малые по сравнению с радиусом кривизны фазового фронта, приближённо ведут себя как П. в.

Лит.: см. при ст. Волны.

М. А. Милаер, Л. А. Островский.

**ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ПЛАСТИНКА** — слой однородной прозрачной среды с показателем преломления  $n$ , ограниченный параллельными плоскостями на расстоянии  $d$  друг от друга. Оптическая толщина П. п. равна  $nd$ , оптическая сила — нулю, увеличение оптической — единице. П. п., поставленная на пути томоцентрич. пучка лучей, смещает изображение, даваемое этим пучком, вдоль оси пучка (продольное смещение) на расстояние  $\delta l = d(1 - \text{tg}^2 i / \text{tg}^2 i')$ , где  $i$  — угол падения пучка лучей,  $i'$  — угол преломления (рис.). Для П. п., находящейся в воздухе,  $\delta l = d(1 - 1/n^2)$ . П. п. сохраняет направление падающего на неё параллельного пучка лучей, но смещает ось этого пучка поперёк на величину  $\delta \xi = d \sin(i - i') / \cos i' = d \sin i$ .



П. п., как оптич. элемент, обладает аберрациями (см. Аберрации оптических систем), в частности сферич. аберрацией ( $n$ -рая при больших углах даёт доплит. смещение  $\delta \xi'$ ), хроматич. аберрацией и астigmatизмом (для достаточно удалённых объектов и малых  $d$  — незначительными).

Толщина П. п. бывает различной в зависимости от допускаемой деформации (прогиба) и возможности изготовления оптически точных поверхностей, необходимых внесения изменений в оптич. длину луча и т. д.

П. п. применяют в качестве защитных стёкол, окон, светофильтров (П. п. из окрашенных материалов), в угломерных приборах для малых угл. смещений изображения, в сек-рых интерферометрах (см. Льюжера — Герке пластинка, Майкельсона эшелон), в качестве оптич. компенсаторов и т. д.

Материалом для изготовления защитных предметов и инокровных пластин служит оптическое стекло К8. Пластыни повышенной точности делают из стекла ЛК5, ситалла или кварца (термостойкие).

**ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ** (плоское движение) твёрдого тела — движение твёрдого тела, при к-ром все его точки перемещаются параллельно нек-рой неподвижной плоскости. Изучение П. д. сводится к изучению движения неизменяемой плоской фигуры в её плоскости, к-рое складается из поступательного движения вместе с нек-рым произвольно выбранным полюсом и вращательного движения вокруг этого полюса. П. д. можно также представить как серию элементарных поворотов вокруг непрерывно меняющихся своё положение мгновенных центров вращения.

**ПЛОСКОСТЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ** — плоскость, проходящая через направление колебаний электрич. вектора линейной поляризов. световой волны (см. Поляризация света) и направление распространения этой волны.

**ПЛОТНОМЕР** — прибор для измерения плотности веществ. Наиб. распространение получил П. для измерения плотности жидкостей. Они делятся на поплавок-весовые, гидростатические, радиоизотопные, вибрационные и ультразвуковые. К П. примыкают приборы для измерения концентрации растворов (сирометры, сахарометры, нефтесиметры и др.). Поплавок-весовые П. представляют собой ареометры ност. массы или пост. объёма. Весовые П. основаны на непрерывном взвешивании определённого объёма жидкости. В гидростатических П. плотность

определяют по разности давлений двух столбов жидкости разной высоты. Действие радиоизотопных П. основано на измерении ослабления пучка  $\gamma$ -лучей в результате их поглощения или рассеяния слоем жидкости. В вибрационных П. используется зависимость резонансной частоты возбуждаемых в жидкости колебаний от её плотности, в ультразвуковых — зависимость скорости звука в среде от её плотности. Радиоизотопный, УЗ, вибрат. и др. методы могут быть применены для определения плотности твёрдых и газообразных веществ.

Лит.: Кив и Лис С. Ш., Приборы для измерения плотности жидкостей и газов, в кн.: Пособия для студентов и средства автоматиз. т. 2, кн. 2, м. 2, М., 1964; Гя и Гбя И. П., Автоматические плотнометры, К., 1965. С. Ш. Киевск.

**ПЛОТНОСТИ МАТРИЦА** — см. Матрица плотности. **ПЛОТНОСТЬ** ( $\rho$ ) — величина, определяемая для однородного вещества его массой в единице объёма. П. неоднородного вещества в определённой точке — предел отношения массы  $m$  тела к его объёму  $V$ , когда объём стигается к этой точке. Средн. П. неоднородного тела также есть отношение  $m/V$ . Часто применяется понятие относительной П.: напр., П. жидких и твёрдых веществ может определяться по отношению к П. дистиллированной воды при 4 °С, а газов — по отношению к П. сухого воздуха или водорода при нормальных условиях. Единица П. в СИ — кг/м<sup>3</sup>, в системе СГС — г/см<sup>3</sup>. П. и уд. вес  $\gamma$  связаны между собой отношением  $\gamma = a\rho g$ , где  $g$  — местное ускорение свободного падения тела,  $a$  — коэф. пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения. П. веществ, как правило, уменьшается с ростом темп-ры и увеличивается с повышением давления (П. воды с повышением темп-ры Т до 4 °С растёт, при дальнейшем понижении Т — уменьшается). При переходах П. вещества из одного агрегатного состояния в другое П. изменяется скачкообразно: резко увеличивается при переходе в газообразное состояние и, как правило, при затвердевании (П. воды и чугуна аномально уменьшается при переходе из жидкой фазы в твёрдую).

Методы измерения П. весьма разнообразны. П. идеальных газов определяется из урния состояния:  $\rho = pM/RT$ , где  $p$  — давление,  $M$  — мол. масса,  $R$  — универсальная газовая постоянная. П. сухого газа, имеющего при нормальных условиях П.  $\rho_0$ , при давлении  $p$  и темп-ре  $T$  определяется ф-лой:  $\rho = \rho_0 p T_0 / (p_0 T K)$ , где  $K$  — коэф. сжимаемости, характеризующий отклонение данного реального газа от идеального. Для влажного газа  $\rho = \rho_0 (p - \varphi p_v) T_0 / (p_0 T K + \varphi p_v)$ , где  $\varphi$  — относит. влажность газа,  $p_v$  и  $p_0$  — табличные значения максимально возможного давления водяного пара при темп-ре  $T$  и максимально возможной его П. при данных  $p$  и  $T$ . П. жидкостей и твёрдых тел находят путём точного определения массы тела и его объёма; используют также зависимость скорости распространения звуковых волн, интенсивности  $\gamma$  и  $\beta$ -излучения, преломления через вещество, и т. д. от П. Приборы для определения П. веществ наз. плотнометрами.

Лит.: ГОСТ 2939—63. Гаи, условия для определения объёма; Измерение массы объёма плотности, М., 1982.

**ПЛОТНОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ** (плотность распределения вероятности) случайной величины  $X$  — ф-ция  $p(x)$  такая, что

$$p(x) \geq 0, \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1$$

и при любых  $a < b$  вероятность события  $a < X < b$  равна

$$\int_a^b p(x) dx.$$

Если  $p(x)$  непрерывна, то при достаточно малых  $\Delta x$  вероятность неравенства  $x < X < x + \Delta x$  приближённо

равна  $p(x)\Delta x$  (с точностью до малых более высокого порядка). Ф-ция распределения  $F(x)$  случайных величин  $X$ , имеющей плотность, связана с П. в. соотношениями

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(y)dy$$

и, если  $F(x)$  дифференцируема,

$$p(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

Случайные величины, имеющие П. в., наз. непрерывно распределёнными случайными величинами, а их распределения — непрерывными (точнее, абсолютно непрерывными) распределениями.

Момент  $MX^r$  любого порядка  $r$  таких случайных величин  $X$  вычисляют по ф-ле

$$MX^r = \int_{-\infty}^{\infty} x^r p(x)dx,$$

если интегралы абсолютно сходятся.

Аналогично определяют совместную П. в. нескольких случайных величин  $X_1, \dots, X_n$  (П. в. совместного распределения):

$$p(x_1, \dots, x_n) \geq 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n = 1,$$

и для любых  $a_i < b_i, i = 1, \dots, n$ , вероятность одновременного выполнения неравенств

$$a_i < X_i < b_i, \dots, a_n < X_n < b_n$$

равна

$$\int_{a_1}^{b_1} \dots \int_{a_n}^{b_n} p(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n.$$

Если существует совместная П. в. случайных величин  $X_1, \dots, X_n$ , то для независимости этих величин необходимо и достаточно, чтобы совместная П. в. была произведением П. в. отд. величин, т. е.

$$p(x_1, \dots, x_n) = p_1(x_1) \dots p_n(x_n),$$

где  $p_i$  — П. в. величин  $X_i$ . По совместной П. в. случайных величин можно найти распределение вероятностей любых ф-ций от этих величин: так, напр., для двух независимых случайных величин с П. в.  $p_1(x)$  и  $p_2(x)$  П. в. их суммы задаётся ф-лой свёртки

$$p(y) = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(y-x)p_2(x)dx.$$

**ПЛОТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ** — число возможных физически неэквивалентных энергетич. состояний в малом интервале энергии  $\mathcal{E}$ , отнесённое к ширине интервала  $\Delta \mathcal{E}: g(\mathcal{E}) = \lim_{\Delta \mathcal{E} \rightarrow 0} \Delta \Gamma(\mathcal{E})/\Delta \mathcal{E}$ , где  $\Delta \Gamma$  — число со-

стояний с энергиями между  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{E} + \Delta \mathcal{E}$  (с учётом возможного вырождения энергетич. состояний). Для колебат. степеней свободы системы часто имеют в виду спектральную П. с.  $g(\omega)$ , определяемую по числу состояний на интервал частот  $\Delta \omega$ . В этом случае  $\omega = \mathcal{E}/\hbar$ .

П. с. имеет смысл вводить, либо если система обладает непрерывным энергетич. спектром, либо если спектр дискретен, когда расстояние между соседними энергетич. уровнями мало по сравнению с  $\Delta \mathcal{E}$ . Если состояния системы определяются широко разнесёнными по  $\Delta \mathcal{E}$  дискретными уровнями, каждый из к-рых помещается в области, узкие по сравнению с расстоянием между уровнями, то вводят П. с. вблизи каждого дискретного уровня. Это имеет место, напр., при движении электронов в сильном квантовом магн. поле (см. *Ландау уровни*, *Лифшица — Оксагера квантования*). Для свободных нерелятивистских частиц со спи-

ном  $s$  состояния характеризуются импульсом  $p$  и проекцией спина, а энергия  $\mathcal{E} = p^2/2m$  ( $m$  — масса) П. с. зависит только от  $p$ :  $g(\mathcal{E}) = \sqrt{2m}v^{1/2}/\pi^2 \hbar^3$ , где множитель  $v = 2s + 1$  учитывает вырождение по спину  $s$ . Для квазичастиц твёрдого тела эта зависимость является более сложной, напр. для электронов проводимости с энергетич. спектром  $\mathcal{E}(p)$

$$g(\mathcal{E}) = \frac{v}{(2\pi\hbar)^3} \left[ ds / |v_p \mathcal{E}'(p)| \right],$$

где интегрирование ведётся по изоэнергетич. поверхности  $\mathcal{E}(p) = \text{const}$  в пространстве квазиимпульсов,  $ds$  — элемент площади на этой поверхности;  $v_p$  — градиент в пространстве квазиимпульсов. Для спектральной П. с.  $g(\omega) = (2\pi)^{-3} ds / |v_\omega(\omega)|$ , где  $\mathbf{k}$  — волновой вектор, а интегрирование ведётся по поверхности  $\omega(\mathbf{k}) = \text{const}$ . Подынтегральные выражения для П. с. имеют особенности в точках, в к-рых групповые скорости  $v = v_p$  обращаются в 0. Эти точки наз. критическими, а соответствующие особенности в  $g(\mathcal{E})$  — *Ван Хофа особенностями*.

Информация о П. с. существенна при определении термодинамич. характеристик твёрдых тел (теплоёмкости, магн. восприимчивости и др.), задаваемых интегралами по энергии от соответствующих микроскопич. величин, умноженных на ф-цию распределения и П. с. На кинетич. характеристики (электропроводность, теплопроводность и др.) также влияет П. с. При этом для вырожденных систем, ферми-частиц, напр. электронов в *металлах*, особенно важна П. с. на поверхности Ферми  $g(\mathcal{E}_F)$ , входящая непосредственно в виде множителя в большинство макроскопич. характеристик систем. Для полупроводников наб. важна П. с. вблизи дна зоны проводимости и потолка валентной зоны.

Для систем, к-рые подпадают случайно распределению в пространстве, в частности для конденсиров. *неупорядоченных систем* (*жидкости, стекла, аморфные вещества* и пр.), П. с. является осн. характеристикой энергетич. спектра. Т. к. П. с. является самоусредняющейся величиной (см. *Мезоскопича неупорядоченной системы*), то можно оперировать с П. с., усреднённой по пространств. распределению частиц (в то время как новитие усреднённого энергетич. спектра лишено смысла).

*Лит.* см. при ст. *Зонная теория*. А. Э. Мейерович.  
**ПЛОТНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА** в классической электродинамике. В макроскопич. электродинамике заряд тела может считаться точечным только если его поле рассматривается на расстояниях, существенно больших, чем характерные размеры заряд. тела. В противном случае электр. заряд считают непрерывно распределённым в нек-рой области пространства и вводят объёмную П. э. з.  $\rho$  в точке  $(x, y, z)$ :

$$\rho(x, y, z) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta e}{\Delta V} = \frac{de}{dV},$$

где  $\Delta e$  — величина заряда, находящегося в объёме  $\Delta V$  в окрестности точки  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ . Если электр. заряд находится в слое, толщиной  $k$ -го можно пренебречь по сравнению с характерным расстоянием, на к-ром рассматривается поле, то определяют поверхностную П. э. з.  $\sigma$ :

$$\sigma(x, y, z) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta e}{\Delta S} = \frac{de}{dS},$$

где  $\Delta e$  — заряд элемента поверхности  $\Delta S$ . Даже если заряд считается точечным, часто из соображений матем. удобства считают его непрерывно распределённым в малой области пространства. В этом случае П. э. з. является *обобщённой функцией*. Если точечный заряд  $e$  находится в точке пространства  $r_0(t)$ , то  $\rho(r, t)$  имеет вид *дельта-функции* Дирака ( $\delta$ )

$$\rho(r, t) = e\delta[r - r_0(t)].$$

П. э. з. системы точечных зарядов определяется выражением

$$\rho = \sum_i e_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i),$$

где  $N$  — полное число зарядов,  $\mathbf{r}_i$ ,  $e_i$  — радиусы-векторы и величины  $i$ -х зарядов.

Введение  $i$ -й П. э. з. позволяет представить интегральную Гаусса теорему, являющуюся одной из основных в электродинамике, в дифференциальной форме:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho,$$

где  $\mathbf{E}$  — напряжённость электрич. поля. Если объёмная П. э. з. всюду конечна, то и вектор  $\mathbf{E}$  всюду конечен и непрерывен. В средах различают П. э. з. свободных и связанных зарядов. П. э. з. связанных зарядов выражается через поляризацию **вектор**  $\mathbf{P}$ :

$$\rho_{\text{св}} = -\nabla \cdot \mathbf{P}.$$

В этом случае теорема Гаусса в дифференциальной форме имеет вид

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho,$$

где  $\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$  — вектор индукции электрич. поля,  $\rho$  — плотность свободных зарядов.

Наличие поверхностной П. э. з. позволяет получить из теоремы Гаусса граничные условия для вектора  $\mathbf{E}$  на соответствующих поверхностях:

$$E_{2n} - E_{1n} = 4\pi\sigma, \quad E_{2t} = E_{1t},$$

где  $E_{1n}$ ,  $E_{2n}$  — проекции поля на нормаль к поверхности, направленную от стороны 1 к стороне 2 поверхности,  $E_t$  — поле, касательное к поверхности. Левая часть первого равенства иногда наз. поверхностной дивергенцией. С ф.з. точки зрения скачок напряжённости электрич. поля на заряд. поверхности возникает из-за того, что точечные заряды на поверхности создают электрич. поле, направленное в разные стороны от поверхности. Если поверхность заряжена положительно, то поле, создаваемое  $\sigma$ , по обе стороны поверхности направлено от поверхности. В случае отрицат. заряда поверхности поле направлено к поверхности. Поскольку реальный физ. заряд всегда сохраняется, то П. э. з. удовлетворяет ур-нию непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0,$$

где  $\mathbf{j}$  — вектор плотности электрич. тока.

Лит.: Тамм И. Е., Основы теории электричества, 10 изд., М., 1989; Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; Джексоу Дж. К., Классическая электродинамика, пер. с англ., М., 1965.

**ПЛОТНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА** — величина, определяющая кол-во электричества  $dI$ , протекающего за единицу времени через произвольного ориентированный элемент поверхности  $dS$ :

$$dI = \mathbf{j} dS.$$

П. э. т.

$$\mathbf{j} = \rho \mathbf{v},$$

где  $\rho$  — объёмная плотность зарядов,  $\mathbf{v}$  — скорость движения зарядов. В том случае, когда имеется неск. сортов заряд. частиц, П. э. т. определяется как сумма по всем сортам ( $\alpha$ ) частиц:

$$\mathbf{j} = \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} \mathbf{v}_{\alpha}.$$

Кол-во электричества, протекающего за единицу времени через всю поверхность, наз. силой тока  $I$ :

$$I = \int \mathbf{j} dS.$$

П. э. т. в СИ измеряется в  $A/m^2$  ( $1 A/m^2 = 3 \cdot 10^9$  ед. СГС/с.см<sup>2</sup>). Вектор П. э. т. в общем случае меняется от точки к точке, образуя векторное поле  $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$ . Для геом. изображения векторного поля П. э. т. вводят линии тока. Линии тока определяются так, чтобы касательные к ним в каждой точке совпадали с направлением вектора П. э. т.

Из закона сохранения электрич. заряда следует соотношение, к-рому удовлетворяет вектор П. э. т. (ур-ние непрерывности):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0.$$

Ур-ние непрерывности можно записать в релятивистски-инвариантном виде, вводя 4-вектор П. э. т.  $j^{\mu} = (c\rho, \mathbf{j})$ :

$$\frac{\partial j^{\mu}}{\partial x^{\mu}} = 0,$$

где  $x^{\mu}$  — координаты четырёхмерного радиуса-вектора  $(ct, \mathbf{r})$ . Из ур-ния непрерывности, в частности, следует, что если П. э. т. и плотность заряда не зависят от времени (пост. ток), то линии тока оказываются замкнутыми или уходящими в бесконечность.

На поверхности раздела двух сред, проводящих сред вектор П. э. т. может иметь разрыв. Однако нормальная составляющая  $j$  (при условии  $\partial \rho_{\text{пов}} / \partial t = 0$ , где  $\rho_{\text{пов}}$  — поверхностная плотность заряда) должна быть непрерывной:

$$j_{1n} = j_{2n}.$$

Если проводник граничит с непроводящей средой, то  $j_n = 0$ . Тангенциальная составляющая плотности тока на границе раздела двух проводников с электропроводностями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  удовлетворяет след. условию:

$$\frac{j_{1t}}{\sigma_1} = \frac{j_{2t}}{\sigma_2},$$

к-рое следует из непрерывности тангенциальной составляющей напряжённости электрич. поля.

Лит.: Тамм И. Е., Основы теории электричества, 10 изд., М., 1989; Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988.

**ПЛОЩАДЕЙ ЗАКОН** — закон движения материальной точки (или центра масс тела) под действием центральной силы, согласно к-рому: а) траекторией точки является плоская кривая, лежащая в плоскости, проходящей через центр силы; б) площадь, заمتаемая радиусом-вектором точки, проведённым из центра силы, растёт пропорц. времени, т. е. точка движется с пост. секторной скоростью. П. з. имеет место при движении планет (см. Кеплера законы), ИСЗ, космич. детальных аппаратов и т. п.

**ПЛУТОН** — девятая по расстоянию от Солнца и последняя из известных планет Солнечной системы. Открыта К. Томбо (С. Tombaugh) в 1930 на основе теоретич. предсказания, сделавших его анализа возмущений в движениях Урана и Нептуна.

П. обращается вокруг Солнца по сильно вытянутой орбите на ср. гелиоцентрич. расстоянии 39,439 астрономической единицы (а. е.) ( $5,91 \cdot 10^{12}$  км). Один полный оборот (сидерич. период обращения) составляет 248,6 земного года, ср. скорость движения по орбите 4,7 км/с. Вследствие большого эксцентриситета орбиты (0,247) планета а перигелии заходит внутрь орбиты Нептуна, однако из-за большого наклонения орбиты П. к плоскости эклиптики ( $17,1^{\circ}$ ) мин. расстояние между орбитами остаётся не менее 2,5 а. е. Вследствие же наличия резонансов (соизмеримостей в движении Плутона, Нептуна и Урана, в результате чего их периоды обращения находятся в отношении примерно как 3 : 2 : 1) П. не подходит к Нептуну на расстояние, меньшее 16 а. е., в то время как с Ураном может сближаться до 10 а. е.

П. представляет собой двойную систему, т. е. имеет спутник, сопоставимый по размерам с планетой. Это позволило, в частности, уточнить её геом. и механич. характеристики. Согласно совр. данным, радиус П. со-

составляет 1150 км (0,66 радиуса Луны), его объём ок. 0,006, а масса ок. 0,002 соответственно объёма и массы Земли. Согласно оценкам, ср. плотность  $\approx 2,03$  г/см<sup>3</sup>. Спутник Харон, открытый в 1978 Дж. Х. Кристи (J. H. Christian) и Р. Харрингтоном (R. Harrington), обращается с периодом, равным периоду вращения самой планеты (6,4 земных суток) на расстоянии 18,5 тыс. км от её центра (16 радиусов Плутона), т. е. находится на синхронной орбите. Радиус Харона т. о. равен 560 км, масса  $\approx 1/30$  массы П., что почти втрое превышает отношение массы Луны и Земли (1/81,4). Плотность, по-видимому, аналогична плотности П. Система Харон — Плутона представляет собой уникальный пример естественного спутникового аппарата в Солнечной системе.

Угл. поперечник П.  $\approx 0,1^\circ$ . Кол-во солнечной энергии, достигающей Плутона, около 0,9 Вт/м<sup>2</sup>, что составляет 0,06% от солнечной постоянной, равной 1370 Вт/м<sup>2</sup>. Альbedo П.  $\approx 0,40$ , эффективная темп-ра 37К. На поверхности П. методами спектроскопии обнаружен метановый лёд, чему отвечает приведённое значение альbedo. По существующим представлениям, планета и её спутник, возможно, в значит. части состоят из метанового льда, если допустить, что в процессе эволюции не происходило заметной дифференциации слагающих вещества. В рамках др. модели П. мог сформироваться при наличии клатрат-гидратов метана (CH<sub>4</sub>·8H<sub>2</sub>O) с последующим их разложением в процессе внутр. эволюции, дегазации CH<sub>4</sub> и образовании протяжённой оболочки метанового льда. Для обеих моделей, исходя из значений ср. плотности, следует предположить, что существ. часть слагающего П. вещества составляет тяжёлая (скальная) компонента. С периодич. сублимацией метана с поверхности вблизи подсолнечной точки, особенно в районе перегибания, может быть связано образование на П. крайне разреженной метановой атмосферы, вероятно, почти полностью исчезающей ночью.

По своим размерам, массе и физ. свойствам П. больше похож не на планету, а на крупный спутник планет-гигантов. Не случайно поэтому рассмотрены модели, согласно к-рым Плутои был равные спутником Нептуна. Потеря произошла либо из-за его тесного сближения с Тритоном (спутником Нептуна), в результате чего движение Тритона стало обратным, а П. был выброшен из системы Нептуна, либо из-за мощного притягивающего воздействия, испытанного системой Нептуна от гипотетич. тела сопоставимых с ним размеров (десятой планеты?) при довольно близком прохождении. Рассмотренные модели пока не имеют достаточно строгого обоснования.

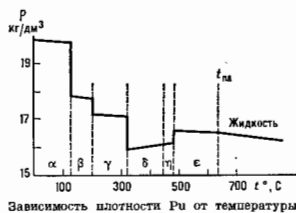
Лит.: Ма р о в М. Я., Планеты Солнечной системы, 2 изд., М., 1986. М. Я. Маров.

**ПЛУТОНИЙ** (Plutonium), Pu, — искусств. радиоактивный хим. элемент III группы периодич. системы элементов Менделеева, ат. номер 94, *трансурановый элемент*, относится к *актиноидам*. Получены изотопы <sup>238</sup>Pu — <sup>240</sup>Pu; среди продуктов взрыва термоядерных бомб обнаружены также <sup>241</sup>Pu и <sup>242</sup>Pu. Наиб. устойчив малодоступный <sup>244</sup>Pu ( $\alpha$ -распад и спонтанное деление,  $T_{1/2} = 8,2 \cdot 10^7$  лет, ат. масса 244,0642). Наибольшее применение имеет <sup>239</sup>Pu ( $\alpha$ -распад и спонтанное деление,  $T_{1/2} = 2,41 \cdot 10^4$  лет, ат. масса 239,0522), практически важны также <sup>238</sup>Pu ( $T_{1/2} = 87,7$  лет), <sup>240</sup>Pu ( $T_{1/2} = 6,56 \cdot 10^8$  лет), <sup>241</sup>Pu ( $T_{1/2} = 14,34$  лет) и <sup>242</sup>Pu ( $T_{1/2} = 3,76 \cdot 10^8$  лет). Ничтожные кол-ва П., образующиеся в урановых рудах за счёт разл. ядерных реакций, обнаружены в природе (содержание 0,4—15 частей Pu на 10<sup>12</sup> частей U).

Первый нуклид <sup>238</sup>Pu открыт в 1940 Г. Т. Сиборгом (G. Th. Seaborg), Э. М. Мак-Милланом (E. M. McMillan), Дж. Э. Кеннеди (J. E. Kennedy) и А. Ч. Валом (A. Ch. Wahl). Электронная конфигурация внеш. оболочек  $5s^2 5p^6 6s^2 5f^7 7s^2$ . Энергия ионизации 5,71 эВ. Металлич. радиус 0,158—0,162 нм, радиусы ионов Pu<sup>3+</sup>, Pu<sup>4+</sup>, Pu<sup>5+</sup> и Pu<sup>6+</sup> (отвечающие координач. числу 6) равны 0,100;

0,086; 0,074 и 0,071 нм соответственно. Значение электроотрицательности 1,1—1,2.

В свободном виде хрупкий серебристо-белый металл. Особенности П. состоят в том, что при темп-рах от комнатной до  $t_{пл} = 640^\circ\text{C}$  он существует в виде 6 модификаций:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\eta$  (последнюю обозначают также  $\delta'$ ) и  $\epsilon$ , темп-ры перехода между к-рыми, по разным данным, составляют соответственно 112—122 $^\circ\text{C}$ , 185—205 $^\circ\text{C}$ , 340—348 $^\circ\text{C}$ , 452—458 $^\circ\text{C}$ , 476—480 $^\circ\text{C}$ . При высоких темп-рах и давлениях возможно существование и др. модификаций металла. П.  $\alpha$ -Pu обладает моноклинной решёткой с параметрами  $a = 0,6183$ ,  $b = 0,4822$ ,  $c = 1,0963$  нм и углом  $\beta = 101,79^\circ$ . Плотность  $\alpha$ -Pu 19,86 кг/дм<sup>3</sup> (изменение плотности П. с ростом темп-ры см. на рис.),  $t_{пл} = 3235$ —3350 $^\circ\text{C}$ , теплоёмкость  $\alpha$ -Pu  $c_p = 35,5$  Дж/(моль·К), теплота плавления 2,834 кДж/моль. Уд. электрич. сопротивление  $\alpha$ -Pu 1,4645 мкОм·см (при 273 К), уд. магн. восприимчивость  $2,28 \cdot 10^{-9}$  (при 273 К), теплопроводность П.



Зависимость плотности Pu от температуры.

4,65—5,80 Вт/(м·К) (при 200—400 К). Ср. значения коэф. теплового расширения для  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -,  $\eta$ - и  $\epsilon$ -модификаций (в единицах  $10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) 42,4, 20,9, 60,0, —15,4, —27,5 и 36,4 соответственно.

При комнатной темп-ре твёрдость по Виккерсу металл. П. 2,4—2,7 ГПа, для  $\alpha$ -Pu (при 20 $^\circ\text{C}$ ) модуль нормальной упругости 98,4 ГПа, модуль сдвига 42,7 ГПа, модуль объёмного сжатия 48,4 ГПа.

По хим. свойствам П. — наиб. активный элемент среди актиноидов. В соединениях проявляет степени окисления от +3 до +7 (наиб. устойчивая +4). Компактный П. на воздухе окисляется медленно, в раздробленном виде самовозгорается на воздухе.

Важнейшие соединения П.: PuO<sub>2</sub> (легкокипящая жидкость, термически значительно менее стабилен, чем UF<sub>6</sub>), твёрдые оксид Pu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, карбид PuC и нитрид Pu<sub>3</sub>N, к-рые в смеси с соответствующими соединениями урана могут использоваться как ядерное топливо.

Осп. применение получил <sup>239</sup>Pu как делящийся материал в ядерных реакторах и ядерном оружии. Критич. масса его  $\alpha$ -модификация 5,6 кг (шар диаметром 4,1 см). <sup>238</sup>Pu используется в «атомных» элементах батарейных, обладающих длит. сроком службы. Изотопы П. служат сырьём для синтеза трансплутониевых элементов (Am и др.). П. и его соединения сильно токсичны.

Лит.: Плутоний. Справочник, под ред. О. Вика, пер. с англ., т. 1—2, М., 1971—73; Вдовенич В. М., Курчатова Б. В., Первый советский плутоний «Радиохимия», 1968, т. 10, в. 6, с. 698; K e i l e r G. C., Plutonium kein Element aus der Retorte, «GIT. Fachz. Lab.», 1985, Bd 29, Nr 7, S. 704.

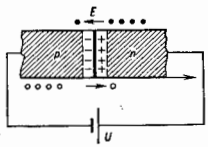
С. С. Ерёменко.

**p — n-ПЕРЕХОД** (электронно-дырочный переход) — слой с повышенной электропроводностью, образующийся на границе полупроводниковых областей с электронной (*n*-область) и дырочной (*p*-область) проводимостью. Различают гомо- и гетеро-переходы, получающиеся в результате изменяющегося в пространстве легирова-

ния донорной и акцепторной примесью одного и того же полупроводника (пар., Si), в гетеропереход, в к-ром р-область и п-область принадлежат разл. полупроводникам. Термин «р-п-п-П.» как правило, применяют к гомопереходам.

**Обедненный слой.** Из-за большого градиента концентрации электронов ( $n$ ) и (обратного ему по знаку) градиента концентрации дырок ( $p$ ) в р-п-П. происходит диффузионное перетекание электронов из п-области в р-область и дырок в обратном направлении. Его следствием является накопление избыточного положительного заряда в п-области и отрицательного — в р-области (рис. 1). При этом появляется электрич. поле,

Рис. 1. Схематическое изображение р-п-перехода; черные кружки — электроны, светлые — дырки.



направленное из п-области в р-область, действие к-рого на электроны и дырки (при термодинамич. равновесии) компенсирует действие градиентов концентрации, т. е. диффузионные потоки электронов и дырок уравновешиваются дрейфовыми потоками во внутреннем электрич. поле  $E_{\text{вн}}$  перехода. Поле  $E_{\text{вн}}$  обуславливает диффузионную разность потенциалов  $V_{\text{д}}$  (аналог контактной разности потенциалов), величина к-рой (для невырожденных носителей) в р- и п-областях выражается ф-лой

$$V_{\text{д}} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_p p_p}{n_i^2} \right). \quad (1)$$

Здесь  $e$  — заряд электрона,  $T$  — темп-ра полупроводника,  $n_i$  — концентрация электронов в собств. полупроводнике,  $n_p$  и  $p_p$  — концентрации электронов и дырок в п- и р-областях. Внутр. электрич. поле сосредоточено в обедненном (зазорном) слое р-п-П., где концентрации носителей обоих типов меньше концентраций основных носителей в р- и п-областях вдали от перехода ( $n < n_p$ ,  $p < p_p$ ), а мн. уровень суммарной концентрации электронов и дырок достигает значения  $(n + p)_{\text{вн}} = = 2n_i$ . Т. к. в обедненном слое, как правило, разность концентраций свободных носителей мала по сравнению с разностью концентраций ионизов. доноров ( $N_{\text{д}}$ ) и акцепторов ( $N_{\text{а}}$ ), границы этого слоя с квазиравновесными р- и п-областями  $w_p$  и  $w_n$  могут быть найдены (после приближенного интегрирования Пуассона уравнения в одномерном случае) из ф-л

$$\int_{w_p}^{w_n} [N_{\text{д}}(x) - N_{\text{а}}(x)] dx = 0, \quad (2)$$

$$(e/e) \int_{w_p}^{w_n} [N_{\text{д}}(x) - N_{\text{а}}(x)] x dx = V_{\text{д}},$$

где  $\epsilon$  — диэлектрич. проницаемость полупроводника. Т. к. Ферми уровень  $\epsilon_F$  во всем полупроводнике при термодинамич. равновесии должен быть единым, то в области перехода энергетич. зоны полупроводника изгибаются (рис. 2), так что образуется потенциальный барьер, высота к-рого равна  $V_{\text{д}}$ .

Внеш. напряжение  $U$ , приложенное к р-п-П., в зависимости от знака уменьшает (и прямое смещение и  $e$ , плюс соответствует р-области) или увеличивает (обратное смещение и  $e$ ) напряженность электрич. поля в обедненном слое, сужая или расширяя его при этом. Зависимость положения границ слоя  $w_n, w_p$  от смещения  $U$  может быть найдена из ф-л (2),

где следует заменить  $V_{\text{д}}$  на  $V_{\text{д}} - U$  ( $U > 0$  при прямом смещении и  $U < 0$  — при обратном). В случае резкого сильно асимметричного р<sup>+</sup>-п-П. ( $N_{\text{а}} \gg N_{\text{д}}$ ) с т. и. ме-

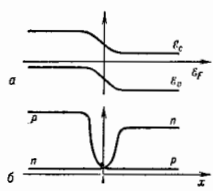


Рис. 2. Зонная диаграмма (а) и концентрации электронов и дырок (б) в области р-п-перехода;  $\epsilon_F$  — дно зоны проводимости;  $\epsilon_C$  — верхняя валентной зоны;  $\epsilon_F$  — уровень Ферми.

таллурч. границей (на к-рой  $N_{\text{д}} - N_{\text{а}} = 0$ )  $x_0 = 0$  и однородно легированной п-областью ( $N_{\text{д}} = \text{const}$ ):

$$w_p \approx 0, \quad w_n = [2e(V_{\text{д}} - U)/eN_{\text{д}}]^{1/2}. \quad (3)$$

В случае плавного р-п-П. с пост. градиентом разности концентрации доноров и акцепторов ( $N_{\text{д}} - N_{\text{а}} = \alpha x$ ,  $\alpha = \text{const}$ ):

$$w_n(U) = -w_p(U) = [3e(V_{\text{д}} - U)/2e\alpha]^{1/2}. \quad (4)$$

Определяемая толщиной обедненного слоя  $w(U) = = |w_n(U) - w_p(U)|$  зарядная емкость  $C_p$  р-п-П. уменьшается с ростом обратного смещения по закону  $C_p \sim (|U| + V_{\text{д}})^{-1/2}$  в случае ф-лы (3) (для резкого перехода) и  $C_p \sim (|U| + V_{\text{д}})^{1/2}$  в случае ф-лы (4) (для плавного перехода). При увеличении прямого смещения зарядная емкость растёт. Измерение зависимости  $C_p(U)$  позволяет исследовать изменение разности  $N_{\text{д}}(x) - N_{\text{а}}(x)$  в р-п-П.

Ток через р-п-П. С включением внеш. напряжения  $U$  дрейфовые потоки перестают компенсировать диффузионные потоки и через р-п-П. течёт электрич. ток. Т. к. в глубине р-области ток переносится дырками, а в п-области — электронами, то прохождение тока через р-п-П. — в прямом направлении ( $U > 0$ ) сопряжено с рекомбинацией электронов и дырок, прибывающих к р-п-П. из областей, где они являются основными носителями заряда. При  $U < 0$  ток обусловлен генерацией электронно-дырочных пар в окрестности р-п-П., к-рой разделяет их движение от р-п-П. в области, где они являются основными носителями.

При термодинамич. равновесии термич. генерация носителей в каждой точке образца в точности компенсируется их рекомбинацией. Но при прохождении тока этот баланс нарушается. Существует неск. механизмов (каналов) избыточной генерации и рекомбинации, определяющих проводимость р-п-П. при прямом и обратном смещениях. а) Генерация и рекомбинация носителей в р- и п-областях и диффузия носителей к р-п-П. или от него. В единице объема п-полупроводник в единицу времени рождается вследствие равновесной термич. генерации  $p_0/\tau_p$  дырок, где  $p_0$  — равновесная концентрация дырок в п-области ( $p_0 = = n_i^2/n_0$ ), а  $\tau_p$  — их время жизни относительно процесса рекомбинации. Все дырки, рожденные в слое с толщиной  $L_p$ , прилегающем к р-п-П., уходят в р-область, т. к. внутр. поле р-п-П. «втягивает» туда все дырки, подошедшие к переходу в результате диффузии из п-области;  $L_p$  — длина диффузии и дырок в п-области за время их жизни:  $L_p^2 = D_p\tau_p$ ,  $D_p$  — коэф. диффузии дырок. Дырки, рожденные вне слоя  $L_p$ , рекомбинируют прежде, чем процесс диффузии доставит их к р-п-П., и не дают вклада в ток. Поэтому плотность тока дырок, уходящих из п-области в р-область:

$$j_{p0} = e p_0 L_p p_0 / \tau_p = e \left( \frac{n_i^2}{n_0} \right) D_p L_p. \quad (5)$$

Аналогично плотность тока электронов, термически рожденных в п-области и доставленных диффузионно к

втягивающему их  $p - n$ -П.:

$$j_{na} = en_p L_n / \tau_n = e \left( \frac{n_p}{n_i / L_p} \right) D_n / L_n. \quad (6)$$

Здесь  $n_p = n_i^* / p_p$  — их равновесная концентрация в  $p$ -области,  $D_n$ ,  $\tau_n$ ,  $L_n$  — коэф. диффузии, время жизни, длина диффузии в этой области [ $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$ ].

Если бы токами  $j_{na}$  и  $j_{pa}$  не противодействовали бы обратные притоки токи, то через  $p - n$ -П. проходил бы ток насыщения плотностью  $j_s = j_{na} + j_{pa}$ . Однако в отсутствие внеш. смещения токи неосновных носителей  $j_{na}$  и  $j_{pa}$  полностью компенсируются токами основных носителей (электронов на  $n$ -области и дырок из  $p$ -области), идущими в обратную сторону и равными, следовательно, также  $j_{na}$  и  $j_{pa}$ . Основные носители — дырки, переходящие на  $p$ -области в  $n$ -область, и электроны, идущие на  $n$ -области в  $p$ -область, преодолевают на своём пути потенциальный барьер высотой  $V_d$  и являются по своей природе термоэлектронной (термодырочной) эмиссией через этот барьер. Поэтому понижение барьера на величину  $U$  при прямом смещении приводит к увеличению каждого из этих токов в  $\exp(eU/kT)$  раз (см. *Термоэлектронная эмиссия*) и не вызывает изменения токов неосновных носителей (для  $k$ -рых барьера нет). С учётом этого обстоятельства плотность полного тока через  $p - n$ -П. можно выразить т. п. ф-лой Шокли (рис. 3):

$$j = j_0 \exp(eU/kT) - 1. \quad (7)$$

При  $U < 0$  и  $e|U|/kT \gg 1$  токами термоэмиссии основных носителей через повышенный обратный смещение барьер (высотой  $V_d + |U|$ ) можно пренебречь и считать, что плотность обратного тока обусловлена только термогенерацией токами неосновных носителей:  $j = -j_s$  (рис. 4, кривая 3). При  $U > 0$  и  $eU/kT \gg 1$ ,

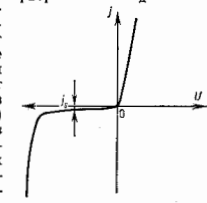


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика (ВАХ)  $p - n$ -перехода.

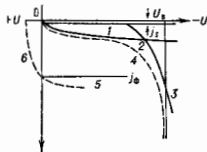


Рис. 4. Обратные токи  $p - n$ -перехода: 1 — ток термогенерации в квазинейтральных областях; 2 — ток термогенерации в обеднённом слое; 3 — ток туннельной генерации; 4 — полный ток в отсутствие фотогенерации; 5 — фототок; 6 — полный ток с учётом фототока.

наоборот, в ф-ле (7) можно сохранить только экспоненциальный член, описывающий термоэмиссию носителей из областей, где они являются основными, в области, где они становятся неосновными и где рекомбинируют за времена  $\tau_p$  и  $\tau_n$  на расстояниях  $L_p$  и  $L_n$ . Прямой ток, согласно (7), быстро растёт с ростом  $U$ . При значит. смещении этот рост ограничивается сопротивлением  $p$ - и  $n$ -областей. Последнее уменьшается благодаря инжекции неосновных носителей  $p - n$ -П. Из сравнения ф-л (5) и (6) видно, что гл. вклад в ток насыщения обычно даёт слаболегиров. сторона  $p - n$ -П. с более низкой концентрацией основных носителей.

6) Генерация и рекомбинация в обеднённых слоях (механизм Шокли — Са-Нойса). Рекомбинационно-генерацион. ток, описываемый ф-лой (7), не всегда доминирует. В широкозонных полупроводниках (с большой запрещённой зоной  $\epsilon_g$ ) при относительно низких темп-рах может преобладать термич. генерация и ре-

комбинация в самом обеднённом слое, а не в слоях с толждинами  $L_n$  и  $L_p$ . Хотя в таком полупроводнике, как кремний,  $L_n$  и  $L_p$  обычно сильно превосходят ширину обеднённого слоя  $w(U)$ , но скорость генерации и рекомбинации там может быть существенно выше, чем в квазинейтральных областях, из-за различия в заполнении примесных уровней электронами, ответственными за рекомбинацию. В этом случае при достаточно больших обратных смещениях ( $eU/kT \gg 1$ ) справедлива ф-ла

$$j = -j_w = -2en_i w(U) / \tau, \quad (8)$$

где  $\tau$  — время жизни неравновесных носителей в обеднённом слое, отличное в общем случае от  $\tau_p$  и  $\tau_n$ . Ток  $j_w$  может превышать  $j_s$  за счёт того, что  $n_i$  превышает  $n_p$  и  $p_n$ . Ток  $j_w$  не насыщается с ростом обратного смещения, а растёт по мере расширения обеднённого слоя [напр., в соответствии с ф-лами (3) и (4), рис. 4, кривая 2].

В прямом направлении ток, обусловленный рекомбинацией в обеднённом слое:

$$j \approx j_c \exp(eU/2kT). \quad (9)$$

Здесь  $j_c \approx en_i \epsilon_g / \tau$ , причём длина  $\epsilon_g$  по порядку величины равна «сжатой» длине диффузии носителей против внутр. поля  $E_{in}$ :  $l \sim kT/eE$ . Коэф. 2 в знаменателе показателя экспоненты связан с тем, что носители, рекомбинирующие внутри обеднённого слоя, преодолевают не весь барьер, обусловленный полем в нём, а только его часть, высота к-рой с приложением внеш. напряжения  $U$  уменьшается на  $U/2$ . Из-за этого с ростом  $U$  ток по ф-ле (9) растёт медленнее, чем ток по ф-ле (7), и даёт ему обогнать себя при достаточно больших смещениях.

в) Межзонное (зиперовское) тунелирование. Ток электронов через запрещённую зону полупроводника отсутствует только при классич. описании движения электронов проводимости и дырок в электрич. поле. Оно становится недостаточным с ростом напряжённости поля. Из-за тунелирования электронов сквозь запрещённую зону (эффект Зинера) тормозящийся в электрич. поле электрон проводимости, отразившись от два зоны проводимости  $\epsilon_c$ , имеет вероятность (тем большую, чем круче наклонены зоны) перейти в валентную зону (рис. 5, а). При одинаковых *абсолютных* массах электрона и дырки вероятность тунелирования в одностороннем электрич. поле близка к вероятности тунелирования сквозь треугольный барьер, высота к-рого равна ширине запрещённой зоны  $\epsilon_g$ , а толщина  $\epsilon_g/eE$  тем меньше, чем больше напряжённость поля  $E$ .

Для реализации туннельного перехода необходимо наличие в валентной зоне дырок. Поэтому туннельный переход является туннельной рекомбинацией электрона из зоны проводимости с дыркой из валентной зоны. Такой рекомбинац. процесс не связан ни с передачей энергии колебаниям решётки (т. е. с её нагревом), ни с излучением света: энергия передаётся источнику электрич. поля. Обратный процесс — рождение электронно-дырочной пары за счёт энергии электрич. поля (туннельная или зиперовская генерация) — в условиях термодинамич. равновесия уравнивает рекомбинацию. Оба эти процесса в  $p - n$ -П. при  $U = 0$  имеют место лишь в случае, когда электронный газ в  $n$ -области и дырочный газ в  $p$ -области вырождены (рис. 5, б). Прямое смещение ведёт к преобладанию туннельной рекомбинации, а обратное смещение — к туннельной генерации. Туннельная составляющая тока такого перехода доминирует над прочими только тогда, когда он предельно резкий. Резкий  $p - n$ -П. с вырожденным газом носителей по обе стороны лежит в основе *туннельного диода*, имеющего на прямой ветви вдоль вольт-амперной характеристики падающий участок  $N$ -типа (ВАХ, рис. 5, в).

В случае невырожденных  $n$ - и  $p$ -областей туннельный ток может преобладать только при достаточно боль-

ших обратных смещениях в связан только с туннельной генерацией электроно-дырочных пар. Ввиду экспоненциальной зависимости туннельного тока от напряженности электрич. поля вклад в него даёт лишь окрестность точки макс. поля. По мере роста обратного напряжения туннельный ток, незаметный на фоне термогенерационного при низких напряжениях, стремительно нарастает и становится преобладающим (рис. 4, кривая 3).

В широкозонных полупроводниках наряду с термогенерационными и туннельными токами наблюдают их различные комбинации. С одной стороны, имеет место сочетание туннельных (горизонтальных) переходов между зонами и уровнями локальных примесных центров с термогенерационными (вертикальными) переходами (рис. 5, в). С др. стороны, возможно туннельное с поглощением неск. фононов (рис. 5, д).

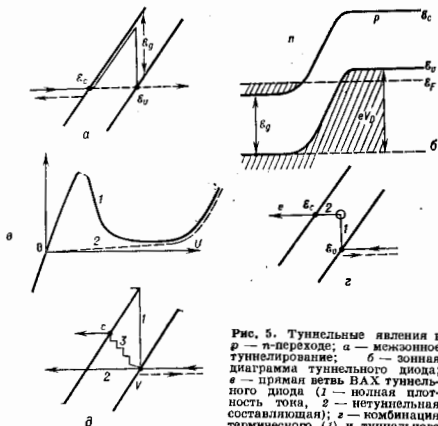


Рис. 5. Туннельные явления в  $p-n$ -переходе: а — межзонное тунелирование; б — зонная диаграмма туннельного диода; в — прямая ветвь ВАХ туннельного диода (1 — зонаная плотность тока, 2 — результирующая составляющая); г — комбинация термогенерации (1) и туннельного (2) переходов с участием примесного уровня; д — возможные варианты генерации: 1 — термическая (многфононная); 2 — туннельная (бесфононная); 3 — тунелирование с поглощением фононов.

г) Ударная ионизация. Электроны проводимости с энергией, превышающей её порог, могут породить электроно-дырочные пары, истратив на это почти всю свою энергию в зоне. Такую же возможность имеют и дырки с надпороговой энергией. Пороги ударной ионизации для электронов и дырок различны (однако во мн. случаях они слегка превышают  $\epsilon_g$ ). Рождение электроно-дырочной пары носителями, ускоренными до необходимых энергий в электрич. поле обратно смещённого перехода, ответственно за лавинное размножение носителей в  $p-n$ -П. и за его лавинный пробой.

Обычно процессы ударной ионизации описывают с помощью коэф.  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$ , определяемых как ср. числа электроно-дырочных пар, генерируемых одним электроном и одной дыркой на единичном пути их дрейфа в электрич. поле  $E$ . В широких обеднённых слоях  $\alpha_{n,p}$  (х) — локальные ф-ции электрич. поля в точке х:

$$\alpha_{n,p}(E) = C_{n,p} \exp(-b_{n,p} p / |E|^m).$$

Здесь  $m = 1, 2$ ; коэф.  $b_{n,p}$  не зависит от  $E$ , а  $C_{n,p}$  зависит слабо. Из-за сильной зависимости  $\alpha_{n,p}$  от  $E$  в ударной ионизации, как и в туннельной генерации, вы-

сит вклад только близкая окрестность точки макс. электрич. поля в обеднённом слое.

Из-за ударной ионизации обратный ток  $p-n$ -П., обусловленный термической или туннельной генерацией, а также фотогенерацией или инжекцией носителей надлетит умножить на коэф.  $M(U)$ :  $i_1(U) = i(U)M(U)$ . При  $\alpha_n = \alpha_p = \alpha(E)$  (приближённо имеющем место во мн. полупроводниках при больших значениях  $|E|$ ) величина  $M(U)$  перестаёт зависеть от места, где произошла первичная генерация, и равна

$$M(U) = \left[ 1 - \int_{w_p(U)}^{w_n(U)} \alpha(E(x)dx) \right]^{-1}$$

(направление оси  $x$  выбрано из  $p$ -области в  $n$ -область).

При  $\int_{w_p(U)}^{w_n(U)} \alpha(E(x)dx = 1 \rightarrow M \rightarrow \infty$ . Это определяет напряжённость  $U_{np}$  лавинного пробоя  $p-n$ -П.: стационарный режим с обратным напряжением на  $p-n$ -П.  $U > U_{np}$  невозможен. Для лавинного пробоя важна ударная ионизация обоими типами носителей. Если в разномощности участвуют, напр., один только электроны, то напряжение  $U_{np} \rightarrow \infty$ .

Лавинный пробой, как правило, имеет микролазменный характер: ток течёт не по всей площади  $p-n$ -П., а локализован в отд. точках (микроплазмах), выявляемых по яркому свечению. С ростом тока пробоя число микроплазм растёт вплоть до однородного покрытия ими всей площади.

Если хотя бы одна сторона  $p-n$ -П. легирована слабо или же  $p-n$ -П. имеет плазную структуру, лавинный пробой наступает при напряжениях, недостаточном для проявления заметной туннельной генерации. В реках переходах с сильным легированием обеих сторон туннельная генерация начинает доминировать до наступления лавинного пробоя, так что ему предшествует на обратной ветви ВАХ участок быстрого туннельного нарастания тока (рис. 4).

д) Фотогенерация, сторонняя инжекция. Током  $p-n$ -П. можно управлять с помощью фотогенерации неравновесных носителей в его окрестности. Ток  $i_f$ , обусловленный фотогенерацией (фототок), в отсутствие лавинного размножения аддитивно складывается с др. составляющими тока, а при наличии лавинного размножения — с составляющими первичного тока. При наличии фототока (кривая 5, рис. 4) ВАХ не проходит через точку  $j = 0, U = 0$ , возникает участок, на котором знак  $i$  совпадает со знаком  $U$  (кривая 6, рис. 4). В этом режиме  $p-n$ -П. выступает в качестве фотозоlementа, преобразующего энергию излучения в электрич. энергию (см. также Солнечная батарея). Кроме режима фотозоlementа используется режим фотодиода, отвечающий обратной ветви ВАХ.

Др. способ управления током  $p-n$ -П. — инжекция неосновных носителей в одну из образующих переход обеднённого полупроводника с помощью др.  $p-n$ -П. или иного инжектирующего контакта. Этот способ управления током  $p-n$ -П. — коллектора путём инжекции  $p-n$ -П. — эмиттером лежит в основе работы транзисторов. Ток  $p-n$ -П. можно также изменять разогревом носителей эл.-магн. излучением СВЧ-диапазона.

Способы получения  $p-n$ -П. Сплавные  $p-n$ -П. получают, нанося на полупроводниковую кристаллич. подложку «чистую» легированную металлург. сплава, в состав которой входит необходимое легирующее вещество. При нагреве образуется область жидкого расплава, состав к-рого определяется совместным плавлением навески и подложки. При остывании формируются рекристаллинал. область полупроводник. обогащённая легирующими атомами. Если тип легирования этой области отличен от типа легирования подложки, то образуется режий  $p-n$ -П., причём его металлургич. граница  $x_0$  совпадает с границей ре-



кристаллазав области. В сплавных переходах на этой поверхности разность изменяется скачком (резкий  $p-n$ -переход).

При вытягивании из расплава формирование перехода происходит в процессе роста полупроводникового слитка путём дозированного изменения состава легирующих примесей в расплаве. Диффузионные переходы получают диффузией легирующих примесей из источников в газообразной, жидкой и твёрдой фазах. Имплантированные переходы образуются при *ионной имплантации* легирующих примесей.

Эпитаксиальные переходы получают методом эпитаксиального выращивания или наращивания, в т. ч. методом молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющим пространственно наиболее точно (с разрешающей способностью до 1 мкм) регулировать закон изменения  $N_d(x) - N_a(x)$ . Часто применяются комбинации способов: после сплавления, имплантации или эпитаксиального выращивания производится диффузионная доводка структуры.

При получении  $p-n$ -П. регулируется не только легирование  $p$ - и  $n$ -областей, во и структура своего переходного слоя; в частности, получается необходимый градиент  $a = d(N_d - N_a)/dx$  в точке металлургич. перехода  $x = x_0$ . В большинстве случаев применяются асимметричные  $p^+-n$ - или  $n^+-p$ -П., в к-рых легирование одной из областей (+) намного сильнее другой.

Применения.  $p-n$ -П. обладает нелинейной ВАХ с большим коэф. выпрямления, на чём основано действие выпрямительных (полупроводниковых) диодов. За счёт изменения толщины обеднённого слоя с изменением напряжения он имеет управляемую нелинейную ёмкость (см. *Варикал*). Включённый в прямом направлении, он инжектирует носители из одной своей области в другую. Инжектиров. носители могут управлять током др.  $p-n$ -П., рекомбинировать с излучением света, превращая  $p-n$ -П. в элементно-миниментный источник излучения (см. *Светодиодный диод*), инверсионно задерживать в области инжекции при быстрых переключениях напряжения на  $p-n$ -П. Ток  $p-n$ -П. управляется светом или др. ионизирующими излучениями (см. *Полупроводниковый детектор*).

Свойства  $p-n$ -П. обуславливают их применение в разл. приборах: выпрямительные, детекторные, смешительные диоды (см. *Диоды твердотельные*); биополарные и униполярные транзисторы; туннельные диоды; лазерно-протонные диоды (СВЧ-генераторы); фотодиоды, лавинные фотодиоды, *фототранзисторы*; *тиристоры*, фототиристоры; фотоэлементы, солнечные батареи; светодиоды, инфрак. лазеры; детекторы частиц и др.  $p-n$ -П. вытесняют *Шоттки барьеры*, изоляционными гетеропереходами, планарно-легированными барьерами.

Лит.: См. ст. Р., Полупроводники, пер. с англ., 2 изд., М., 1983; 3 и С. М. Физика полупроводниковых приборов, кн. 1-2, пер. с англ., М., 1984; Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г., Физика полупроводников, М., 1977.  
З. С. Грибачев.

**ПОВОБЧНЫЕ СЕРИИ** — *спектральные серии* в спектрах атомов щелочных металлов. Различают 1-ю П. с. (диффузную серию) и 2-ю П. с. (резкую серию). Наблюдаются в испускании (в поглощении лишь при высоких темп-рах) при переходах между верхними уровнями  $S$  (резкая серия) или  $D$  (диффузная серия) и самым нижним  $P$ -уровнем. Линии П. с. лежат в ИК- и видимой областях опич. спектра.

Лит.: См. при ст. *Атомные спектры*. М. А. Бельштейн. **ПОВЕРКА** — средства измерения — определение погрешностей средств измерений и установление их пригодности к применению. П. производится органами метрол. служб при помощи эталонов и образцовых средств измерений. Обязательной гос. П. подлежат средства измерений, применяемых для учёта материальных ценностей, гос. испытаний, регистрации

национал. и междунар. рекордов в спорте, а также для П. исходных образцовых средств измерений. Ведомств. П. подлежат все остальные средства измерений.

Описание методов и техн. приёмов П. конкретных средств измерений содержится в соответствующих гос. стандартах или методич. указаниях. Нередко методы П. и соответствующие калибровочные приборы указываются в поверочных схемах, устанавливающих порядок и точность передачи размеров единиц от образцовых эталонов, а от них — рабочим средствам измерений.

Лит.: Бурдуи Г. Д., Марков В. Н., Основы метрологии, 3 изд., М., 1983; Тюрин И. И., Введение в метрологию, 3 изд., М., 1985.  
К. П. Ширков.

**ПОВЕРХНОСТНАЯ ДИФФУЗИЯ** — процесс, связанный (как и в случае объёмной диффузии) с перемещением частиц, как правило, за счёт случайных тепловых блужданий (обычно атомов или молекул), происходящих на поверхности конденсиров. тела в пределах первого поверхностного слоя атомов (молекула) или поверх него. Наб. полн. изучена П. д. атомов одного вида по поверхности твёрдого тела, состоящего из атомов др. вида. Энергетич. барьеры на поверхности, к-рые преодолеваются диффундирующими частицами, существенно ниже энергетич. барьеров в объёме твёрдого тела. Поэтому энергия активации для П. д. (иногда говорят «для миграции частиц»)  $Q_p$  составляет лишь часть  $Q_0$  — энергии активации для диффузии в объёме для той же пары диффундирующей атом — матрица. В зависимости от кристаллографии, природы подложки, степени покрытия поверхности диффузанта (адсорбатом), темп-ры, характера взаимодействия частиц адсорбата и подложки и частиц адсорбата между собой реализуются разл. механизмы П. д. Напр., при малых степенях покрытия атомы могут перемещаться по поверхности поодиночке, практически не взаимодействуя между собой. При больших степенях покрытия атомы могут образовывать «по дороге» думерные ассоциации, растущие и разрушающиеся. Атомы на сильно смачиваемой подложке (т. е. сильно притягиваемые подложкой) при больших степенях покрытия «прямрают» в первом слое, а движение осуществляется по атому, собственному, слою атомов с закреплением на краю расширяющегося слоя адсорбата. Возможно также движение думерных связанных групп (думерное брουνсовское движение) или даже перемещение нек-рых областей слоя как целого при погружении в него из верхнего (избыточного) слоя новых частиц (солитонный механизм). Возможны и иные промежуточные и комбинар. механизмы П. д. Каждый из них характеризуется вполне определённой  $Q_p$ , так что для одной и той же пары веществ могут быть получены сильно различающиеся энергии активации (и, соответственно, коэф. диффузии). Спектр  $Q_p$  и реализующихся механизмов П. д. богаче, чем для объёмной диффузии. Обычно П. д. рассматривают как процесс, определяющий изменение поверхностной концентрации адсорбата от неравновесной к равновесной при наличии соответствующих градиентов концентрации. В более общем случае имеют в виду вообще перемещение частиц при тепловом движении. Так, в случае перемещения по поверхности твёрдого тела собств. частиц (поверхностной самодиффузии) на первый взгляд не имеет смысла говорить о концентрации, но вполне можно рассматривать концентрацию собств. частиц в разл. положениях на поверхности: одиночные, у края ступени, в ступени и т. д. И если ситуация отличается от равновесной, перемещение частиц приведёт к заметным изменениям шероховатости или даже формы поверхности.

П. д. и самодиффузия исследуются экспериментально разл. методами, регистрирующими результат перемещения частиц (меченые атомы, измерение *работы выхода*). Однако наиб. точно данных по П. д., в т. ч. весьма определённых и детализированных, получают методами полевой эмиссионной микроскопии (электронной и

жонной; см. *Ионный проектор, Атомный зонд*). В этом случае, кроме измерения  $Q_d$ , может диффузия, предэкспоненциального множителя в ур-нии диффузии, однозначно определяется механизм перемещения частиц.

Данные О. П. д. важны для ряда техн. приложений, таких как ионные двигатели, точечные источники ионов, катоды и др., а также для решения смежных науч. задач: определения сил связи на поверхности, изучения двумерных фазовых переходов, кинетики катализа, реакций, определения поверхностной энергии аннотропных твёрдых тел.

**Лит.:** Поверхностная диффузия и растекание. Сб. ст., под ред. Я. Е. Гегузина, М., 1969; О д а н а р и я Г. А., Ш р е т т и и В. Н., Об автоматизированных методах количественного изучения поверхностной диффузии и самодиффузии, Труды 1-го Всесоюзного совещания по автономной микроскопии, Харьков, 1976, с. 81 (ХФТИ 76-43); М о л о д т с о в Э., Ц о л о г Т., Поверхностная диффузия, поляризованная ионная ионизация, пер. с англ., М., 1980; Г е г у з и н Я. Е., К а г а н о в с к и й Ю. С., Диффузионные процессы на поверхности кристалла, М., 1984; N a t u r e v s A. G., V e d u l a Y u. S., Surface Diffusion of adsorbates, «Surface Sci. Rep.», 1984, v. 4, p. 385.

В. Н. Шревшик.

**ПОВЕРХНОСТНАЯ ИОНИЗАЦИЯ** — образование ионов в процессе термич. десорбции частиц с поверхности твёрдого тела. Путём П. и. могут образовываться положительные и отриц. ионы (последние, если частица обладает *сродством к электрону*) атомов, молекул, радикалов и ассоциатов (частиц, образующихся присоединением к молекуле атома или др. частицы). П. и. — термический равновесный процесс, испарившиеся частицы имеют большемасовое распределение по энергии с темп-рой  $T$  распределения, равной темп-ре твёрдого тела.

П. и. была открыта И. Ленгюром и К. Х. Кингдонном (I. Langmuir, K. H. Kingdon, 1923), обнаружившим, что в заполненном парами Сз цилиндрчик, диеэ с анодом в виде накалённой вольфрамовой проволоки протекает ток положит. ионов. Они применили *Сага формулу* для термич. ионизации газа к описанию ионизации паров одноатомных веществ внутри однородно нагретой металл. полости и напши выражение для стенки П. и.  $\alpha$ , равной отношению концентраций ионов ( $n_+$ ) и атомов ( $n_0$ ) внутри полости:

$$\alpha = n_+/n_0 = A_+ \exp\{e(\varphi - V)/kT\}. \quad (1)$$

Здесь  $A_+$  — отношение статистич. весов состояний положит. ионов и атомов;  $e$  — элементарный заряд;  $\varphi$  — работа выхода электрона из стенки полости;  $V$  — потенциал ионизации атома;  $T$  — темп-ра стенок полости. Ф-ла (1) наз. ф-лой С а х а — Л е н г ю р а . П. и. с образованием отрицат. ионов была обнаружена позднее. В этом случае:

$$\alpha = n_-/n_0 = A_- \exp\{e(S - \varphi)/kT\}, \quad (2)$$

где  $S$  — сродство атома к электрону,  $A_-$  — отношение статистич. весов состояний отрицат. ионов и атомов.

Долгое время изучали и использовали П. и. на тугоплавких металлах атомов щелочных элементов (с наименьшим  $V$ ) и атомов галогенов (с наибольшими  $S$ ). В дальнейшем было установлено, что на нагретых твёрдых телах (металлах и полупроводниках) могут ионизироваться атомы многих элементов, ряд молекул (в т. ч. органич. соединений), а также частиц, образующихся в хим. реакциях на поверхности; первичные частицы сложного состава могут претерпевать реакции по многим каналам (напр., диссоциировать) и образовывать одновременно неск. видов ионов.

Для практич. использования важна П. и. частиц на открытых поверхностях, в условиях отбора ионного тока при действии внешних электрич. полей, ускоряющих ионы в направлении от поверхности. При этом ионизация также может быть термическим равновесной, если за время жизни частиц на поверхности между ними и твёрдым телом устанавливается тепловое равновесие. В этом случае под степенью П. и. понимаем отношение числа заряд. частиц к числу нейтральных того же хим. состава в испаряющемся потоке частиц и применяют для

нахождения  $\alpha_+$  соотношения статистич. термодинамич. учитывая, что ускоряющее поле уменьшает теплоту испарения ионов. При напряжённости поля  $E$  у поверхности

$$\alpha_+(E) = \begin{cases} A_+ \exp\{e(\varphi - V + \sqrt{eE})/kT\}, \\ A_- \exp\{e(S - \varphi + \sqrt{eE})/kT\} \end{cases} \quad (3)$$

и может быть значительно большей, чем в отсутствие поля. В случае частиц сложного состава в (3)  $V$  — первый адiabатич. потенциал ионизации,  $A_+$  — отношение полных статистич. сумм состояний заряженной и нейтральной частиц при темп-ре  $T$ .

Т. к. величина  $\alpha$  характеризует зарядовое равновесие в испаряющемся потоке частиц, она не зависит от способа поступления частиц на поверхность: они могут поступать из окружающего пара, в виде атомных и молекулярных потоков, быть частицами поверхностного слоя самого твёрдого тела или чужеродными частицами, предварительно нанесёнными на поверхность, а также объёмными примесями, диффундирующими к поверхности. В условиях теплового равновесия в слое частиц на поверхности различия в способах поступления частиц сказываются лишь на температурных и временных зависимостях поступающих и испаряющихся потоков и, соответственно, ионных токов. Сложившиеся разделение термическим равновесной ионизации на нагретых поверхностях на П. и. (первые два способа) и на терм. о н и о н н у ю з м и с с и ю (остальные способы) отражает лишь различие способов транспорта первичных частиц к конпарующей поверхности.

В стационарных условиях при поступлении частиц назве поток  $v$  поступающих частиц равен испаряющемуся ( $v = v_+ + v_0$ ), так что при  $T = \text{const}$  и  $v = \text{const}$  на поверхности устанавливается равновесное покрытие  $N(T, v)$  первичными частицами; потоки  $v_+$  и  $v_-$ , и, соответственно, ионные токи постоянны во времени:

$$v_+ = NC \exp(-I_+/kT), \quad v_0 = ND \exp(-I_0/kT),$$

где  $I_-$  — энергия, необходимая для десорбции частиц, а  $C$  и  $D$  — слабо зависящие от  $T$  множители. Для вычисления плотностей  $j$  стая, ионных токов вводят коэф. П. и.  $\beta_+ = v_+/v$ , показывающий, какая часть поступающего потока частиц конизируется,  $\beta = \alpha/(1 + \alpha)$ .

В случае первичных частиц сложного состава и поток  $v$  к поверхности может превращаться в неск. ( $i$ ) видов вторичных частиц в результате диссоциации, хим. реакций и т. д. Его можно представлять состоящим из  $i$  потоков  $v_i$  и считать ионизацию частиц каждого вида независимой. При этом  $v_i$  и  $v$  связаны соотношением  $v_i(T, E) = \gamma_i(T, E)v$ , где  $\gamma_i$  — коэф. выхода реакции на поверхности по  $i$ -му каналу. В общем случае  $j_{i+} = ev(1-R)\gamma_i\beta_i$ , где  $R$  — коэф. отражения первичных частиц от поверхности. Подставляя  $\beta_i$ , получим:

$$j_{i+} = \frac{ev(1-R)\gamma_i}{1 + A_{i+} \exp\{e(V_i - \varphi - \sqrt{eE})/kT\}} \quad (4)$$

$$j_{i-} = \frac{ev(1-R)\gamma_i}{1 + A_{i-} \exp\{e(S_i - \varphi - \sqrt{eE})/kT\}}$$

При П. и. атомных потоков  $R = 0$ ,  $\gamma = 1$ . Для трудноионизируемых веществ ( $\alpha \ll 1$ ) выражения (4) упрощаются (рис. 1):

$$j_{i+} \approx ev(1-R)\gamma_i A_{i+} \exp\{e(\varphi + \sqrt{eE} - V_i)/kT\}, \\ j_{i-} \approx ev(1-R)\gamma_i A_{i-} \exp\{e(S_i - \varphi + \sqrt{eE})/kT\}. \quad (5)$$

Измеряя  $j$ , можно найти каждую из входящих в (5) величин. На этом основаны поверхностно-ионизационные методы исследования поверхности твёрдого тела и процессов взаимодействия частиц с твёрдым телом.

В случае  $\alpha \gg 1$ , когда  $e(\varphi + \sqrt{eE} - V_i) \gg kT$  и  $e(S_i + \sqrt{eE} - \varphi) \gg kT$ , плотность ионного тока:

$$j_{i+} \approx ev(1-R)\gamma_i. \quad (6) \quad 645$$

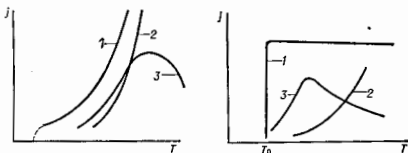


Рис. 1. Зависимости  $j(T)$  при  $\alpha < 1$ ,  $E = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$  для случаев:  $\gamma = 1$  (1),  $\gamma$  возрастает с увеличением  $T$  (2);  $\gamma$  уменьшается с увеличением  $T$  (3).

Рис. 2. Зависимости  $j(T)$  при  $\alpha > 1$ ;  $\gamma = 1$  (1),  $\gamma$  возрастает с увеличением  $T$  (2),  $\gamma$  уменьшается с увеличением  $T$  (3).

Особенностью «лёгкой» ионизации ( $\alpha \gg 1$ ) является существование температурного порога  $T_0$  (рис. 2) и температурного и полевого гистерезисов (вблизи  $T_0$ ). Величина  $T_0$ , зависящая от теплот испарения ионов и нейтральных частиц с поверхности, увеличивается с ростом  $v$  и уменьшается при увеличении  $E$ . Пороговые явления вызваны зависимостью теплоты испарения ионов и нейтральных частиц от степени покрытия и от  $E$ .

В случае  $\alpha > 1$  при  $T > T_0$  ионизируется практически каждая адсорбированная частица или каждая образованная ею вторичная частица;  $j$  слабо зависит от  $T$  и  $E$ , если  $\gamma = 1$  или постоянна, и значит, превосходит ток<sub>1</sub>, получаемые с помощью др. видов ионизации.

В случае неоднородных по ф твердых тел (напр., полукристаллических) на эмиссию ионов оказывают влияние т. н. контактные поля пятен (см. Работа выхода). При их компенсации внешним электрич. полем новый ток равен сумме токов с отдельных пятен. При этом в интервале  $T$  порядка неск. сотен градусов ф-лы (4,5) сохраняются при введении в них усредненных значений  $\phi^*$ ,  $A^*$ ,  $\rho^*$ . Из-за сильной зависимости  $\alpha$  от ф, положит. ионы трудноизируемых веществ образуются преимущественно на участках с  $\phi_{\text{макс}}$ , а отрицательные ионы — с  $\phi_{\text{мин}}$ ; так что при сравнимых площадях пятен  $\Phi^+ \ll \Phi_{\text{макс}}$ ,  $\Phi^- \gg \Phi_{\text{мин}}$ .

В нестационарных условиях ( $v \neq v_0 + v_{\pm}$ ) покрытие  $N$  и ионный ток  $I$  изменяются со временем. Часто специально создают такие условия, нарушающие равновесие адсорбированной слои реаким изменением  $v$ ,  $T$ , или знака приложенного напряжения  $V$ . По изменению  $I$  со временем при разных  $T$  можно найти все кинетич. параметры термич. десорбции ионов (а в ряде случаев и нейтральных частиц), определяющие величины потоков частиц с поверхности:  $i_1, i_0, C, D$ , а также ср. времена жизни частиц на поверхности по отношению к термодесорбции в виде ионов и нейтральных частиц.

П. и. — один из эфф. способов пюнизации. Она позволяет получать измеримые токи положит. ионов от частиц с  $V \leq 9В$ , а отрицат. ионов — от частиц с  $S \geq 0,6В$ . В большом числе комбинаций частица — твердое т.п. осуществляется лёгкая ионизация.

П. и. используется в ионных источниках, детекторах молекулярных и атомных пучков (включая селективные детекторы и газоанализаторы органич. соединений), для компенсации объёмного заряда электронов в разл. устройствах. П. и. позволяет исследовать мн. физико-хим. процессы на поверхности твёрдого тела, а также свойства частиц и поверхности твёрдого тела. Применяются свыше 30 поверхностно-ионизационных методов для определений:  $V$  и  $S$  атомов, молекул и радикалов; кинетич. характеристик термодесорбции этих частиц в виде ионов и в нейтральном состоянии; для изучения реакций на поверхности твёрдого тела; фазовых переходов в адсорбированных слоях; для определения активности катализаторов в гетерогенных реакциях диссоциации и др. Эти методы пригодны при  $v \gg 1$  и имеют большую чувствительность, если  $\alpha > 1$ . Существуют комбинированные методы, в к-рых П. и. сочетается с термоэлектронной эмиссией, с электро-стимулированной десорбцией и др.

Лит.: Зандберг Э. Я., Ионов Н. И., Поверхностная ионизация, М., 1969; и х же, Методы физико-химических исследований, основанные на явлении поверхностной ионизации, в сб.: Проблемы современной физики. К 100-летию со дня рождения А. Ф. Иоффе, Л., 1960; Зандберг Э. И., Расулов У. X., Поверхностная ионизация органических соединений, «Успехи химии», 1982, т. 51, в. 9; Зандберг Э. Я., Наваров В. Г., Расулов У. X., Применение стационарных процессов поверхностной ионизации в исследовании взаимодействия частиц с поверхностью твёрдого тела, «Изв. АН СССР, сер. физ.», 1985, т. 49, в. 9, с. 1666.

Д. Я. Зандберг.  
ПОВЕРХНОСТНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЗАРЯДА — см. Плотность электрического заряда.

**ПОВЕРХНОСТНАЯ СИЛА** в механике — сила, приложенная к точкам поверхности данного тела. Примерами П. с. являются сила атм. давления на поверхности тела, силы сопротивления среды, действующие на движущиеся в этой среде тела, реакции опор.

**ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ** — избыток (по сравнению с объёмными фазами) энергии поверхностного слоя между соприкасающимися фазами, приходящийся на единицу площади разделяющей поверхности. Если последняя делит двухфазную систему  $A - B$  на части с объёмами  $V_A$  и  $V_B$ , то П. э. равна

$$\bar{U} = U - uAV_A - uBV_B,$$

где  $U$  — внутр. энергия системы,  $u^{A,B}$  — плотности энергии в объёме фаз  $A$  и  $B$ . Аналогично определяются поверхностная энтропия  $\bar{S}$ , свободная П. э.  $\bar{F} = \bar{U} - T\bar{S}$  и др. поверхностные термодинамич. потенциалы. Их численные значения зависят от положения разделяющей поверхности, к-рое для плоских поверхностей обычно выбирается из условия равновесия нулю адсорбции одного из компонентов (эквимолекулярная поверхность). В однокомпонентной системе уд. П. э. и уд. свободная П. э.  $\sigma$  (см. Поверхностное натяжение) связаны ур-нием Гиббса — Гельмгольца:

$$\bar{u} = \sigma - T\partial\sigma/\partial T.$$

Для границы жидкость — газ  $\partial\sigma/\partial T = \bar{s} > 0$  ( $\bar{s}$  — уд. поверхностная энтропия) и  $\bar{u} > \sigma$ . В отличие от поверхностного натяжения П. э. слабо зависит от темп-ры.

Свободная П. э. определяет работу образования зародышей новой фазы и свободную энергию активации процесса фазового превращения. Существование свободной П. э. и поверхностного натяжения является причиной возникновения метастабильных состояний (стойкий переохлаждения, пересыщения). Свободная П. э. определяет процессы диспергирования, адгезии и смачивания. При низком значении свободной П. э. возникает самопроизвольное диспергирование фаз, происходящее, напр., вблизи критич. состояния. При смачивании погружением изменение свободной П. э. определяет работу смачивания (правило Дюпре). При неолном смачивании свободная П. э., входя в ур-ние Юнга, определяет равновесную форму капли или пузыря и величину краевого угла (см. Смачивание).

Равновесная форма аннотропного тела в общем случае определяется минимумом свободной П. э. при заданном объёме тела  $V$  (принцип Гиббса — Кюри):

$$\sum_i \sigma_i A_i = \min, \quad V = \text{const}$$

(суммирование по всем возможным  $i$  поверхностям с площадями  $A_i$ ). Согласно правилу Вудфа (1895), вытекающему из принципа Гиббса — Кюри, равновесная форма монокристалла характеризуется наличием точки (точки Вудфа), расстояния  $h_i$  от к-рой до граней кристалла провондорнальны их свободным П. э.:  $\sigma_i/h_i = \text{const}$ . Чем выше свободная П. э. грани, тем меньше её вклад в свободную П. э. всего кристалла. В соответствии с принципом Гиббса — Кюри для изотропного тела равновесная форма — шарообразная, она присуща каплям и пузырям в отсутствие внеш. полей. Эти принципы определяют также форму микелл (см. Поверхностно-активные вещества, Полимеры).

Кроме П. э. и её аналогов в термодинамике поверхностных явлений рассматриваются характеристики межфазных линий, к-рые могут возникать на кривых пересечении поверхностей, так и в пределах одной поверхности, если на ней происходит двумерный фазовый переход. Избыток энергии на межфазной линии называют линией энергии. Существуют понятия линейной свободной энергии и др. одномерных аналогов поверхностных величин. Свободная линейная энергия влияет на кинетику двумерных фазовых превращений, кинетику гетерогенной нуклеации, определяет краевую угол малых капель и пузырьков на жидкой и твёрдой поверхности. Линейная свободная энергия вносит вклад в формирование равновесной формы малых кристаллов.

Лит.: Рубин в А. И. Фазовое равновесие и поверхностные явления, Л., 1967; Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика, пер. с англ., М., 1982; Роули и Коси Дж., Уилдом Б., Молекулярная теория капиллярности, пер. с англ., М., 1986. А. И. Русачко.

## ПОВЕРХНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА

(ПАВ) — вещества (как правило, органич. соединения), обладающие высокой поверхностной активностью, т. е. способностью адсорбироваться на межфазных границах и сильно снижать поверхностное натяжение. Мерой поверхностной активности может служить значение производной  $d\sigma/dc$  при  $c \rightarrow 0$ , где  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $c$  — объёмная концентрация ПАВ. В принципе любое вещество в определённых условиях может проявить поверхностную активность. В особый класс ПАВ выделяются вещества, имеющие высокую поверхностную активность на границах водного раствора.

Поверхностная активность обусловлена строением молекул ПАВ: они дифильны, т. е. содержат одновременно гидрофильную (полярную) и гидрофобную (липофильную) атомные группы (см. *Гидрофильность и гидрофобность*). В качестве гидрофильных могут выступать функциональные группы спиртов ( $-\text{OH}$ ), кислот ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{SO}_3\text{Na}$  и др.) и их солей, аминов ( $-\text{NH}_2$ ) и др. группы. Липофильные группы обычно представляются углеводородными или фторуглеродными радикалами.

Одна молекула ПАВ может содержать неск. групп обоих видов. Для того чтобы ПАВ собралось преим. на границе фаз (а не внутри одной из них), гидрофильная и липофильная части молекул должны быть энергетически сбалансированы. Соответствующая количеств. характеристика — число гидрофильно-липофильного баланса (ГЛБ) по шкале Гриффина — Дэвиса задаётся соотношением  $\text{ГЛБ} = 7 + 0,36 W/kT$ , где  $W$  — работа переноса 1 молекулы ПАВ из полярной в неполярную фазу (обычно из воды в жидкий углеводород). Для большинства ПАВ число ГЛБ находится в интервале 0—40. Малые числа ГЛБ соответствуют малорасторчивым, большие — водорастворимым ПАВ. Числа ГЛБ обладают свойством аддитивности по отношению к отд. группам молекулы ПАВ. Имеются таблицы групповых чисел, по к-рым быстро рассчитывается число ГЛБ для любого соединения. Число ГЛБ определяет назначение и эффективность действия ПАВ.

Наиб. важной классификацией ПАВ является классификация по ионным свойствам гидрофильных групп: 1) анионные (анионоактивные) ПАВ, способные диссоциировать в полярном растворителе с образованием поверхностно-активных анионов — соли карбоновых кислот (в т. ч. мыла), алкилсульфаты, алкилсульфонаты, алкиларилсульфонаты, фторуглеродные сульфонаты и др.; 2) катионные (катионоактивные) ПАВ, способные диссоциировать с образованием поверхностно-активных катионов (производные алкалминов и др.); 3) амфотерные (амфолитные) ПАВ, содержащие неск. полярных групп и дающие при диссоциации, в зависимости от величины  $\text{pH}$  в водном растворе поверхностно-активные анионы или катионы; 4)witterионные ПАВ, в нейтральных полярных средах к-рых противоионные заряды существенно разделены в

пространстве др. структурными элементами молекул (напр., бетаны состава  $\text{RN}^+(\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_4)_n(\text{GN})_3\text{CH}_2\text{COO}^-$ , где  $\text{N}$  — алкил с числом атомов углерода 8—12); 5) неионные (неионогенные) ПАВ с протяжённой полярной группой — полиоксизетиленовые эфиры алкилфатич. спиртов и кислот, алкилфенолов, аминов и др. соединений. Первые 3 типа часто объединяются под общим назв. ионных (ионогенных) ПАВ. Наиб. распространены анионные и неионные ПАВ. Поверхностно-активные вещества также делятся на низко- и высокомолекулярные (с периодич. расположением гидрофильных и липофильных групп в линейной полимерной цепи), масло- и водорастворимые, коллоидные (мицеллообразующие, их отличает оптимальная величина ГЛБ) и неколлоидные. Др. направление классификации — по названию ПАВ. Различают эмульгаторы (ГЛБ 3,5 — 6 и 8—18), смачиватели (7—9), моющие агенты (детергенты, 13—15), солилизаторы (15—18) и т. д.

Адсорбция ПАВ при малой объёмной концентрации носит мономолекулярный характер (см. *Мономолекулярный слой*) и сопровождается возникновением *поверхностного давления*. Кинетика адсорбции определяется скоростью диффузии и для лек-рых ПАВ специфич. энергетич. барьером адсорбции, связанным с молекулярным строением ПАВ. Равновесная мономолекулярная адсорбция одного ПАВ описывается ур-нием Ленгмюра  $\theta = kc/(1 + kc)$ , где  $\theta$  — степень заполнения моноосла,  $c$  — концентрация ПАВ в объёмной фазе,  $k$  — постоянная для данного вещества величина. На межфазной границе молекулы ПАВ располагаются так, что гидрофильная группа остаётся в фазе, состоящей из полярных молекул. При адсорбции из водных растворов большую роль играет гидрофобный эффект — стремление воды к ликвидации внутр. полостей и выталкиванию гидрофобных тел, обусловленное межмолекулярным взаимодействием и структурой воды. Благодаря гидрофобному эффекту липофильные углеводородные или фторуглеродные цепи молекул ПАВ выталкиваются из водного раствора в воздух, соседнюю жидкую фазу из неполярных молекул или ирижируются к поверхности твёрдого тела. На границе раствор — воздух цепи ориентируются при малых  $\theta$  горизонтально, при больших  $\theta$  — вертикально.

Мицеллы ПАВ — молекулярные или ионные агрегаты размером ок. 3—100 нм, возникающие в растворах коллоидных ПАВ по достижении критич. концентрации мицеллообразования. Мицеллярные растворы ПАВ обладают специфич. свойствами. Переход к мицеллообразованию происходит в узком интервале концентрации, и его можно трактовать как фазовый переход 2-го рода. Причиной мицеллообразования в водных растворах является гидрофобный эффект, а в средах из неполярных молекул — взаимное притяжение полярных групп молекул ПАВ. При приближении концентрации ПАВ к критич. концентрации мицеллообразования происходит резкое изменение свойств раствора: электропроводности, поверхностного натяжения, коэф. рассеяния света, осмотич. давления, коэф. диффузии и т. д. Ниже определённой темп-ры (точки Крафта) образования мицелл не происходит, а при увеличении концентрации ПАВ наблюдается кристаллизация. Кривая равновесия мицеллярного раствора с твёрдой фазой на диаграмме состояния наз. границей Крафта. Её верхний предел соответствует нижней темп-ре существования жидких кристаллов, образовании д-рых характерен для концентриров. растворов ПАВ. Для мицелл характерен полиморфизм: при повышении концентрации ПАВ форма мицелл переходит от сферической к цилиндрической (стержнеобразной), а затем — к пластинчатой (дискообразной).

Мицеллярные растворы могут растворять вещества, малорастворимые в данном растворителе, этот процесс наз. солюбилизацией. Он состоит в проникновении молекул растворимого вещества в мицеллы. Солюбилизация может происходить не только из соседней фа-

зы, по и из состава адсорбционного слоя раствора. На этом основан метод обнаружения в ПАВ поверхностно-активных примесей: ниже критич. концентрации миделлообразования они в большой концентрации находятся в адсорбционном слое и поверхностное натяжение падает с увеличением концентрации раствора, выше этой концентрации — переходят в мицеллы и поверхностное натяжение возрастает. Т. о., наличие минимума на изотерме поверхностного натяжения раствора ПАВ свидетельствует о примесях в ПАВ.

ПАВ оказывают стабилизирующее действие в эмульсиях и др. дисперсных системах (суспензиях, пенах).

Применение ПАВ многообразно и продолжает расширяться. ПАВ используются как моющие средства, ингибиторы коррозии, смачиватели, плёнообразователи, пенообразователи, пеногасители, эмульгаторы, диспергаторы, регуляторы роста кристаллов. Известны применения ПАВ в процессах флотации, для повышения отдачи нефтяных пластов, сборки нефти, борьбы с угольной пылью, гашения воли и турбулентности, замедления испарения водоёмов, придания водоотталкивающих свойств почвам, цементам и др. материалам. Добавки ПАВ повышают качество строит. материалов, смазок и металлообрабатывающего инструмента. ПАВ необходимы для производства хим., пищевых, лекарственных эмульсий, пен (пожарных пен, пенопластов, пенобетонов и т. п.), аэрозолей и др.

Лит.: Абрамзон А. А., Поверхностно-активные вещества, 2 изд., Л., 1981; Русанов А. И., Левичев С. А., Жаров В. Т., Поверхностное разделение веществ, Л., 1981.

А. И. Русанов.

**ПОВЕРХНОСТНОЕ ДАВЛЕНИЕ** — характеристика мономолекулярного слоя, равная разности *поверхностных натяжений* чистой подложки (жидкой или твёрдой)  $\gamma_0$  и подложки с находящимся на ней монослоем:  $\gamma = \gamma_0 - \gamma$ . П. д. наз. также двумерным давлением. Разреженный монослой подчиняется ур-нию состояния двумерного идеального газа:  $\pi A = kT$ , где  $A$  — площадь, приходящаяся на одну молекулу в монослое. По изменению П. д. в процессе сжатия монослоя можно судить о происходящих в монослое фазовых превращениях. У монослоев адсорбционной природы (растворимых монослоев) площадь  $A$ , а следовательно, и П. д. оказываются связанными с концентрацией вещества монослоя в объёмной фазе. Для адсорбционных слоёв *поверхностно-активных веществ* (ПАВ) эта связь хорошо описывается ур-нием Шинскового

$$\pi = a \ln(1 + bc),$$

в к-ром константа  $a$  едина для гомологич. ряда ПАВ, а константа  $b$  увеличивается в 3—3,5 раза при удлинении углеводородной цепи молекулы ПАВ в данном гомологич. ряду на одну группу  $\text{CH}_2$  (правило Дюкло — Траубе). Для смеси растворимых  $k$  и нерастворимых  $j$  ПАВ П. д. даётся ур-нием Кротова

$$\pi = a \ln \left( 1 + \frac{\sum_{k \neq j} b_k c_k}{\sum_{j \neq k} \theta_j} \right),$$

где  $\theta$  — степень заполнения монослоя. П. д. нерастворимого монослоя на жидкой подложке можно непосредственно измерить как силу на единицу длины линейного барьера, отделяющего область монослоя от области чистой поверхности.

А. И. Русанов.

**ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ** (межфазное натяжение) — механич. и термодинамич. характеристика межфазной поверхности, определяемая *межмолекулярными взаимодействиями* и структурой поверхностного слоя. Механически П. н. ( $\gamma$ , Н/м) определяется по аналогии со средним (гидростатич.) напряжением как половина следа двумерного тензора избыточных поверхностных напряжений (тензора натяжений)  $\gamma_{ik}$  отнесённого к нек-рой геом. разделяющей поверхности с координатой  $z_0$  между соприкасающимися фазами  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\gamma = \frac{\gamma_{11} + \gamma_{22}}{2}, \quad \gamma_{ik} = \int_{-\infty}^{z_0} [\sigma_{ik}(z) - \sigma_{ik}^{\beta}] dz + \int_{z_0}^{\infty} [\sigma_{ik}(z) - \sigma_{ik}^{\alpha}] dz,$$

где  $\sigma_{ik}$  — обычный тензор напряжений, зависящий в поверхностном слое от нормальной к поверхности координаты  $z$ . При равновесии изотропных макрофаз, напр. жидкости и газа, величина  $\gamma = \gamma_{11} = \gamma_{22}$  не зависит от положения разделяющей поверхности. Термодинамически  $\gamma$  определяется как работа обратного образования единицы площади новой поверхности путём растяжения старой. Аналогичная работа  $\sigma$  (Дж/м<sup>2</sup>) образования поверхности разрезанием тела, часто также называемая П. н., имеет смысл уд. свободной поверхностной энергии для чистой жидкости и уд. поверхностного большого термодинамич. потенциала — для многокомпонентной жидкой смеси (в случае твёрдого тела  $\sigma$  — поверхностная плотность нек-рой ф-ции, обладающей свойством свободной энергии по отношению к малоподвижным компонентам кристаллич. структуры и большого термодинамич. потенциала по отношению к легкодиффундирующим компонентам). Тензор натяжений  $\gamma_{ik}$ , тензор деформации  $\epsilon_{ik}$  (см. *Деформация*) и с связью изотермич. соотношением

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon_{ik}} = \gamma_{ik} - \sigma \delta_{ik}$$

а при наличии изотропии

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \ln A} = \gamma - \sigma$$

( $A$  — площадь межфазной поверхности). Для жидкостей  $\gamma = \sigma > 0$ , что свидетельствует о наличии реальной тангенциальной стягивающей силы вдоль поверхности. Наб. П. н. имеют расплавы металлов (напр., Pt при 2300 К обладает  $\gamma = 1,820$  Н/м). Для твёрдых тел диффузионное равновесие между поверхностью и объёмом устанавливается медленно, поэтому  $\gamma \neq \sigma$ , причём  $\sigma > 0$ , а  $\gamma$  может иметь любой знак (по имеющимся оценкам, у ионных кристаллов  $\gamma < 0$ ).

Связь П. н. с др. параметрами состояния даётся ур-нием адсорции Гиббса (см. *Поверхностные явления*). У чистых веществ П. н. снижается с ростом темп-ры. Повышение давления приводит к уменьшению П. н. при заметной взаимной растворимости фаз и к возрастанию П. н. в противоположном случае (напр., в системе вода — гелий). Присутствие веществ с положительной адсорбцией вызывает снижение П. н. (наб. эффект дают *поверхностно-активные вещества*, а с отрицательной (характерной, напр. для аэрионич. солей в воде) — повышение П. н. Вдали от критич. точки гравитацион. поле практически не изменяет П. н.

Влияние внеш. электрич. поля существенно зависит от наличия в поверхностном слое спонтанной поляризации (характерной для воды и полярных жидкостей) и поверхностного электрич. потенциала. Если радиус кривизны поверхности много больше эфф. толщины поверхностного слоя, П. н. практически не зависит от форм поверхности. При достаточном уменьшении размера фазы эта зависимость появляется, причём П. н. определяется знаком кривизны поверхности: для капель чистой жидкости уменьшается, а для пузырьков — возрастает с уменьшением их радиуса. При наличии искривлённой поверхности П. н. оказывает влияние и на состояние внутр. объёмной фазы: повышается её давление и *химические потенциалы*, давление равновесного пара (см. *Кельвина уравнение*), растворимость, меняется темп-ра фазового перехода.

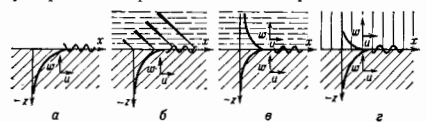
П. н. жидкостей обуславливает широкий круг *капиллярных явлений*. В основе всех методов измерения П. н. лежит закон Лапласа. При помощи спец. таблиц можно определить П. н. по форме мениска у плоской стенки, форме капли (лежачей или висшей) или её экстремальным параметрам, по высоте капиллярного поднятия, по силе удержания контакта с поверхностью жидкости или отрыва от неё пластины, кольца, цилиндра,

конуса или шара, по натяжению жидкой плёнки, по размеру и весу падающих капель, по макс. давлению в пузырьке, по кавитационным волнам. Из методов измерения динамики. П. н. наиб. известен метод осциллирующей струи. Для измерения очень малых П. н. на границе жидкость — жидкость, характерных, напр., для окрестности критич. состояния, используется метод вращающейся капли. П. н. малых зародышей новой фазы можно определить по скорости их образования. П. н. в твёрдых тел обычно определяют косвенно, исходя из межмолекулярных, межатомах и межионных взаимодействий.

Лит.: О но С., Коидо С., Молекулярная теория поверхностного натяжения в жидкостях, пер. с англ., М., 1963; Рутс и н в А. Я., Фазовые равновесия и поверхностные явления, т. 1, 1967; Гошштейн А. Я., Поверхностное натяжение твёрдых тел и адсорбция, М., 1976. А. И. Русанов.

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ (ПАВ)** — упругие волны, распространяющиеся вдоль свободной поверхности твёрдого тела или вдоль границы твёрдого тела с др. средой и затухающие при удалении от границы. ПАВ бывают двух типов: с вертикальной поляризацией, у к-рых вектор колеблется, смещения частиц среды в волне расположены в плоскости, перпендикулярной к граничной поверхности (вертикальная плоскость), и с горизонтальной поляризацией, у к-рых вектор смещения частиц среды параллелен граничной поверхности и перпендикулярен направлению распространения волны.

Простейшими и наиб. часто встречающимися на практике ПАВ с вертикальной поляризацией являются *Рэлея волны*, распространяющиеся вдоль границы твёрдого тела с вакуумом или достаточно разреженной газовой средой. Энергия их локализована в поверхностном слое толщиной от  $\lambda$  до  $2\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны. Частицы в волне движутся по эллипсам, большая ось — параллельна направлению распространения волны (рис., а). Фазовая скорость волн Рэлея  $c_R \approx 0,9c_t$ , где  $c_t$  — фазовая скорость плоской поперечной волны.



Схематическое изображение поверхностных волн различного типа (слоншлой штриховкой обозначены твёрдые среды, прерывистой — жидкость;  $x$  — направление распространения волны;  $u$ ,  $v$  и  $w$  — компоненты смещения частиц в данной среде; кривые изображают примерный ход изменения амплитуды смещений с удалением от границ раздела сред): а — волна Рэлея на свободной границе твёрдого тела; б — затухающая волна типа Рэлея на границе твёрдого тела; в — жидкость (наклонные линии в жидкой среде изображают волновые фронты отходящей волны, толщина их пропорциональна амплитуде смещений); г — незатухающая поверхностная волна на границе твёрдого тела и жидкости; з — волна Стоуни на границе раздела двух твёрдых сред; д — волна Лива на границе твёрдого полупространства — твёрдым слоем.

Если твёрдое тело граничит с жидкостью и скорость звука в жидкости  $c_{ж}$  меньше скорости  $c_t$  в твёрдом теле (это справедливо почти для всех реальных сред), то на границе твёрдого тела и жидкости возможно распространение затухающей волны рэлеевского типа. Эта волна при распространении непрерывно излучает энергию в жидкость, образуя в ней отходящую от границы неоднородную волну (рис., в). Фазовая скорость данной ПАВ с точностью до процентов равна  $c_t$ , а коэф. затухания на длине волн  $< 0,1$ , т. е. на пути 10 $\lambda$  волна затухает примерно в  $e$  раз. Распределение по глубине

смещений и напряжений в такой волне в твёрдом теле подобно распределению в рэлееской волне.

Помимо затухающей ПАВ, на границе жидкости и твёрдого тела всегда существует незатухающая ПАВ, бегущая вдоль границы с фазовой скоростью, меньшей скорости  $c_{ж}$  волны в жидкости и скоростью продольных  $c_l$  и поперечных  $c_t$  волн в твёрдом теле. Эта ПАВ, являясь волной с вертикальной поляризацией, имеет совершенно другие структуру и скорость, чем рэлееская волна. Она состоит из слабо неоднородной волны в жидкости, амплитуда к-рой медленно убывает при удалении от границы (рис., е), и двух сильно неоднородных волн в твёрдом теле (продольной и поперечной). Благодаря этому энергия волны и движение частиц локализованы в основном в жидкости, а не в твёрдом теле. В практике подобный тип волны используется редко.

Если две твёрдые среды граничат между собой вдоль плоскости и их плотности и модули упругости не сильно различаются, то вдоль границы может распространяться ПАВ Стоуни (рис., з). Эта волна состоит как бы из двух рэлееских волн (по одной в каждой среде). Вертикальная и горизонтальная компоненты смещений в каждой среде убывают при удалении от границы так, что энергия волны оказывается сосредоточенной в двух граничных слоях толщиной  $\sim \lambda$ . Фазовая скорость волн Стоуни меньше значений  $c_l$  и  $c_t$  в обеих граничных средах.

Волны с вертикальной поляризацией могут распространяться на границе твёрдого полупространства с жидким или твёрдым слоем или даже с системой таких слоёв. Если толщина слоёв много меньше длины волны, то движение в полупространстве примерно такое же, как в рэлееской волне, а фазовая скорость ПАВ близка к  $c_k$ . В общем случае движение может быть таким, что энергия волны будет перераспределяться между твёрдым полупространством и слоями, а фазовая скорость будет зависеть от частоты и толщи слоёв (см. *Дисперсия звука*).

Кроме ПАВ с вертикальной поляризацией (в основном это волны рэлеевского типа) существуют волны с горизонтальной поляризацией (волны Лива), к-рые могут распространяться на границе твёрдого полупространства с твёрдым слоем (рис., д). Это волны чисто поперечные: в них имеется только одна компонента смещения  $v$ , а упругая деформация в волне представляет собой чистый сдвиг. Смещения в слое (индекс 1) и в полупространстве (индекс 2) описываются след. выражениями:

$$v_1 = \frac{A}{\cos \theta_1} \cdot \cos s_1 (h - z) \cdot \sin(\omega t - kz),$$

$$v_2 = A \exp(s_2 z) \sin(\omega t - kz),$$

где  $t$  — время,  $\omega$  — круговая частота,  $s_1 = \sqrt{k^2 t_1^2 - k^2}$ ,  $s_2 = \sqrt{k^2 - k_2^2}$ ,  $k$  — волновое число волны Лива,  $k_{t1}$ ,  $k_{t2}$  — волновые числа поперечных волн в слое и полупространстве соответственно,  $h$  — толщина слоя,  $A$  — произвольная постоянная. Из выражений для  $v_1$  и  $v_2$  видно, что смещения в слое распределены не косинусом, а в полупространстве — экспоненциально убывают с глубиной. Глубина проникновения волны в полупространство меняется от долей  $\lambda$  до многих  $\lambda$  в зависимости от толщины слоя  $h$ , частоты  $\omega$  и параметров сред. Само существование волны Лива как ПАВ связано с наличием слоя на полупространстве: при  $h \rightarrow 0$  глубина проникновения волны в полупространство стремится к бесконечности и волна переходит в объёмную. Фазовая скорость  $c$  волн Лива заключена в пределах между фазовыми скоростями поперечных волн в слое и полупространстве  $c_{t1} < c < c_{t2}$  и определяется из ур-ния

$$\lg \frac{\omega}{c_{t1}} h \sqrt{\frac{c_{t1}^2}{c^2} - \eta^2} = \frac{s_2}{c_{t2}} \frac{h}{\rho_1} \cdot \sqrt{\frac{s_1^2}{c_{t1}^2} - \eta^2},$$

где  $\rho_1, \rho_2$  — плотности слоя и полупространства соответственно,  $\eta^2 = c_{12}^2/c^2$ . Из урния видно, что волны Лява распространяются с дисперсией: их фазовая скорость зависит от частоты. При малых толщинах слоя, когда  $\omega h/c_{12} \rightarrow 0, \eta \rightarrow 1$ , т. е. фазовая скорость волны Лява стремится к фазовой скорости объемной поперечной волны в полупространстве. При  $\omega h/c_{12} \gg 1$  волны Лява существуют в виде неск. модификаций, каждая из к-рых соответствует нормальной волне определённого порядка.

На границах кристаллов могут существовать всё те же типы ПАВ, что и в изотропных твёрдых телах, только движение в волнах усложняется. Вместе с тем аннотация твёрдого тела может вносить нек-рые качества изменения в структуру волн. Так, на нек-рых плоскостях кристаллов, обладающих пьезоэлектрич. свойствами, волны типа волн Лява, подобно волнам Рэлея, могут существовать на свободной поверхности (без присутствия твёрдого слоя). Это т. н. электроакустические волны Гуллевая — Блюштейна. Наряду с обычными волнами Рэлея в нек-рых образцах кристаллов вдоль свободной границы может распространяться затухающая волна, излучающая энергию в глубь кристалла (вытекающая волна). Наконец, если кристалл обладает пьезоэффектом и в нём есть поток электронов (пьезополупроводниковый кристалл), то возможно взаимодействие поверхностных волн с электронами, приводящее к усилению этих волн (см. *Акустоэлектронное взаимодействие*).

На свободной поверхности жидкости уругие ПАВ существовать не могут, но на частотах УЗ-диапазона и ниже там могут возникать поверхностные волны, в к-рых определяющими являются не уругие силы, а иоверхностное натяжение — это т. н. капиллярные волны (см. *Волны на поверхности жидкостей*).

Ультра- и гиперзвуковые ПАВ широко используются в технике для вестороннего неразрушающего контроля поверхности и иоверхностного слоя образца (см. *Дефектоскопия*), для создания микроразрешенных схем обработки электрич. сигналов и т. д. Если поверхность твёрдого образца свободная, то применяются рэлевские волны. В тех случаях, когда образец находится в контакте с жидкостью, с др. твёрдым образцом или твёрдым слоем, рэлевские волны заменяются другим соответствующим типом ПАВ.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория уругости, 4 изд., М., 1987; Викторов И. А., Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лява в технике, М., 1966, гл. 1; Гетто и в, Звуковые поверхностные волны в твёрдых телах, М., 1981; Физическая акустика, под ред. В. Маона, Р. Терстона, пер. с англ., т. 6, М., 1973, гл. 3; Поверхностные акустические волны, под ред. И. А. Векслера, М., 1981.

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ** (поверхностные поляритоны) — поверхностные эл.-магн. волны оптич. диапазона, распространяющиеся вдоль границы раздела двух сред и существующие одновременно в них обеих. Поля, переносимые этими волнами, локализованы вблизи поверхности и затухают по обе стороны от неё. П. о. в. являются частично продольными электромагнитными волнами ТМ-типа: магн. вектор  $H$ , перпендикулярный направлению распространения П. о. в., лежит в плоскости поверхности; электрич. вектор имеет две составляющие:  $E_x$  — вдоль волнового вектора  $k_x$  и  $E_z$  — перпендикулярно поверхности (рис. 1, а). П. о. в. описываются ур-ниями Максвелла со стандартными граничными условиями. Распределение каждой из компонент (А) электрич. и магн. полей на частоте  $\omega$  в плоской П. о. в., бегущей вдоль оси  $x$  (рис. 1, а), имеет вид

$$A = A_0 \exp(\pm i k_x z) \exp(i(k_x x - \omega t)),$$

где  $A_0$  — амплитуда,  $k_x > 0, k_z > 0$  — коэф. затухания П. о. в. в средах 1 и 2,  $t$  — время. Знак (+) относится к средам 1 ( $z < 0$ ); (—) — к среде 2 ( $z > 0$ ) (рис. 1, б). При заданной амплитуде магн. вектора  $A_0 = \mathcal{H}$  амплитуды остальных компонент равны:

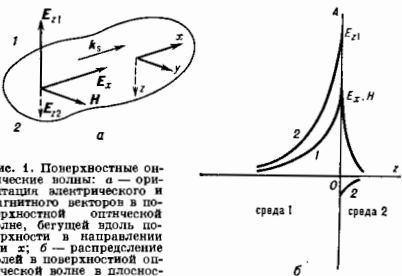


Рис. 1. Поверхностные оптические волны: а — ориентация электрического и магнитного векторов в поверхностной оптической волне, бегущей вдоль поверхности в направлении оси  $x$ ; б — распределение полей в плоской оптической волне в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. 1 — для компонент  $E_x$  и  $H_x = H$ , непрерывных при  $z = 0$ ; 2 — для компоненты  $E_z$ , испытывающей при  $z = 0$  скачок.

$$E_x = \frac{i}{\sqrt{-(\epsilon_1 + \epsilon_2)}} \mathcal{H}; \quad E_z = -\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1(\epsilon_1 + \epsilon_2)}} \mathcal{H};$$

$$E_z = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2(\epsilon_1 + \epsilon_2)}} \mathcal{H},$$

где  $\epsilon_1 = \epsilon_1(\omega), \epsilon_2 = \epsilon_2(\omega)$  — диэлектрич. проницаемости сред 1 и 2 на частоте  $\omega$ . Волновой вектор  $k_x$  удовлетворяет дисперсионному соотношению

$$k_x = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}},$$

где  $k_0 = \omega/c, c$  — скорость света в вакууме. Коэф. затухания  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  определяются как

$$\kappa_1 = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 - \epsilon_2}}; \quad \kappa_2 = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_2 - \epsilon_1}}.$$

Из условия вещественности и положительности величин  $k_x, \kappa_1$  и  $\kappa_2$  следует, что П. о. в. могут существовать только на границе раздела двух сред с диэлектрич. проницаемостями равных знаков. Если в среде 1  $\epsilon_1 > 0$ , то диэлектрич. проницаемость среды 2, т. н. поверхностно-активной среды (ПАС), должна удовлетворять условию

$$\epsilon_2 < 0, \quad |\epsilon_2| > \epsilon_1. \quad (*)$$

Обычно П. о. в. возбуждают на границе ПАС с воздухом ( $\epsilon_1 = 1$ ) или др. прозрачным диэлектриком. Для металлов и легков. полупроводников с высокой концентрацией свободных носителей равенство (\*) выполняется в области аномальной дисперсии диэлектрич. проницаемости, к-рая занимает весь ИК- и видимый (для металлов) диапазон частот и ограничена сверху частотой поверхностного плазмона  $\omega_{ps}$  (для частот  $\omega \geq \omega_{ps}$  металл становится прозрачным и П. о. в. не возбуждаются, см. *Металлооптика*). На рис. 2 показана типичная дисперсионная кривая  $\omega(k_x)$  для П. о. в. на металле, или поверхностных плазмон-поляритонов (параметры  $\omega$  и  $k_x$  нормированы соответственно на

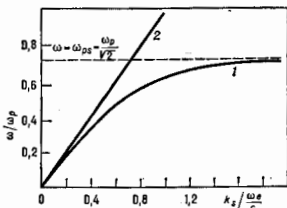


Рис. 2. Дисперсионная кривая поверхностных плазмон-поляритонов (1) на плоской границе раздела металла и вакуумом;  $\omega_p$  — плазменная частота электронов; 2 — свставная линия  $\omega = c k_x$ .

плазменную частоту электронов  $\omega_p$  и  $k_0$ ). П. о. в. могут также возбуждаться на поверхности полупроводников и диэлектриков в среднем ИК-диапазоне, в интервале между частотами продольного и поперечного оптич. фононов, где диэлектрич. проницаемость испытывает аномальную дисперсию. Соответствующие П. о. в. наз. также поверхностными фонон-поляритонами. Существуют П. о. в. и в области экситонного поглощения на полупроводниках.

Разработано неск. эффективных методов возбуждения П. о. в. светом (рис. 3): призмный, решётчатый и

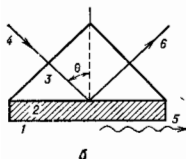
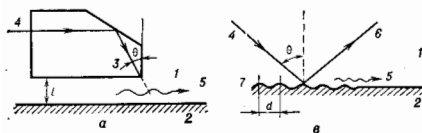


Рис. 3. Возбуждение поверхностных оптических волн: а — призмный метод, геометрия Отто; б — призмный метод, геометрия Кречмана; в — решётчатый метод. 1 — диэлектрик (воздух); 2 — ПАС (металл); 3 — призма; 4 — падающее излучение; 5 — поверхностная оптическая волна; 6 — зеркально отражённое излучение; 7 — решётка; l — зазор размером  $\sim \lambda$ ; d — период решётки.

с помощью краевых диафрагм. В призмном методе, существующем в двух модификациях (геометрия Отто, рис. 3, а и геометрия Кречмана, рис. 3, б), используется явление *нарушенного полного внутреннего отражения* при падении р-поляризованного излучения (поляризованного в плоскости падения) со стороны оптически более плотной среды под углом  $\theta > \arcsin(\epsilon_2/\epsilon_1)^{1/2}$ , где  $\epsilon_2 > \epsilon_1$  — диэлектрич. проницаемость материала призмы. В этом случае П. о. в. возбуждаются на гладкой поверхности, где непосредственно отсутствует вольновод, т. е. волновой вектор П. о. в. больше волнового вектора света  $k_0$  на той же частоте (рис. 2). При призмном методе (рис. 3, а) П. о. в. возбуждаются в  $\pm 1$ -м порядке дифракции падающего р-поляризованного излучения на решётках с периодом  $d = \lambda/(\eta \pm \sin\theta)$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $\eta = k_0/k_0 - \text{эфф.}$  показатель преломления границы раздела для П. о. в. В большинстве случаев источники падающего излучения при возбуждении П. о. в. являются лазеры. Эффективность преобразования падающего объёмного излучения в П. о. в. в ИК-области достигает десятых долей, а в геометрии Кречмана для видимого света практический доходит до 1. Обратное преобразование П. о. в. в объёмное излучение также возможно с помощью призм и решёток.

Исследование и применение П. о. в. является перспективным и быстро развивающимся разделом оптики и спектроскопии твёрдого тела. Это обусловлено уникальными свойствами П. о. в., к-рые при распространении вдоль поверхности сосредоточены в ПАС в том же слое, что и объёмное излучение той же частоты (напр., в skin-слое металла толщиной  $10^{-9} - 10^{-8}$  см). Длина пробег П. о. в. вдоль поверхности в ИК-области спектра может достигать неск. см и весьма чувствительна к процессам в поглощающем слое, к состоянию поверхности и её изменениям, наличию адсорбиров. слоёв, влёнок, шероховатости и др. Это позволяет использовать метод возбуждения П. о. в. для исследования поверхности и границ раздела, а также для оптич. измерений, напр. измерения поглощения металлич. зеркал на уровне 0,01 с точностью до 10%. Интерес к П. о. в. и др. поверхностным эл.-магн. возбуждениям связан

также с тем, что в процессе лазерных воздействий на ПАС обнаружены последствия их генерации. Среди них: гигантское комбинац. рассеяние адсорбиров. молекул; усиленная генерация второй гармоники при отражении света от металла; образование поверхностных периодич. структур и рост эффективного коэф. поглощения при нагреве металлов и полупроводников лазерно-поляризов. лазерным излучением; возбуждение ТЕ-поляритонов на границе линейной и вильевой сред и др.

Лит.: Поверхностные поляритоны, под ред. В. М. Аграновича, Д. Л. Миллса, М., 1985.

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ СОСТОЯНИЯ** — электронные состояния, локализованные вблизи поверхности кристалла. Волновая ф-ция П. с. затухает в обе стороны от поверхности кристалла. Различают соств. П. с., обусловленные обрывом кристаллич. решётки на границе, и несобственные, локализованные на примесях или дефектах, находящихся на поверхности или в слое оксида, покрывающего поверхность. Соств. П. с. образуют разрешённые энергетич. зоны, разделённые априорными зонами, и их волновые ф-ции характеризуются волновым вектором  $k_{\parallel}$ , лежащим в плоскости, касательной к поверхности. Поверхностные разрешённые зоны могут располагаться в области энергий, соответствующих как запрещённым, так и разрешённым объёмным зонам (см. *Зонная теория*). При отсутствии в объёме состояний с  $\epsilon'$  и  $k_{\parallel}$ , соответствующих П. с., эти П. с. наз. *истинными*, в обратном случае — *поверхностными резонансами*.

На возможность существования П. с. впервые указал И. Е. Тамм (1932), к-рый рассмотрел электронный спектр ограниченной одномерной решётки, состоящей из прямоугольных потенциальных ям, разделённых прямоугольными барьерами (см. *Крочица — Пенин модель*). Поэтому соств. П. с. наз. таммовскими состояниями. Их появление обусловлено отличиями высот потенциальных барьеров у ям в объёме и у поверхности. Поане Шоки (W. Shockley) показал, что П. с. могут возникать и в том случае, когда высоты потенциальных барьеров одинаковы, но в каждой яме есть нек. уровней и зоны, происходящие от этих уровней, пересекаются. В реальных кристаллах таммовские состояния соответствуют оборванным (ненасыщенным) валентным связям поверхностных атомов. Обычно в результате обрыва этих связей происходит перестройка ям, *реконструкция поверхности*, т. е. смещение приповерхностных атомов как в плоскости, касательной к поверхности, так и по нормали к ней, в результате чего на поверхности образуются структуры с периодом, равным неск. периодом объёмной решётки или несоизмеримым с ними. Характер реконструкции зависит от кристаллографич. ориентации поверхности, метода её приготовления, в частности от темп-ры отжига, а также от типа и концентрации адсорбиров. примесей или наличия на ней слоя оксида. Напр., на поверхности (111) Si реализуются структуры с периодами  $(1 \times 1)$ ,  $(2 \times 1)$ ,  $(7 \times 7)$ , на поверхности  $(100)$  — структуры  $(2 \times 1)$ ,  $(4 \times 2)$ ,  $(2 \times 2)$ , а на той же поверхности с адсорбиров. водородом структуры  $(1 \times 1)$ ,  $(3 \times 1)$ .

Спектр П. с. существенно зависит от типа реконструкции и от ориентации поверхности. Расчёт спектров П. с. проводится теми же методами, что и расчёт состояний в объёме. При самосогласов. расчётах одновременно определяются смещение поверхностных атомов (характер реконструкции поверхности) и распределение электронной плотности.

Для изучения соств. П. с. используют поверхность, получаемые сколом в высоком вакууме или жидком He; плёнки, получаемые методом молекулярной эпитаксии, а также поверхности, очищенные бомбардировкой ионами инертных газов с последующим отжигом в вакууме. Адсорбция чужеродных атомов или окисление поверхности изменяют спектр П. с. и, в частности, обычно приводят к исчезновению соств. П. с.



в области запрещённых зон полупроводников и появлению в этой области несость. П. с.

П. с. обнаружены у мн. металлов, полупроводников и диэлектриков. П. с., находящиеся в запрещённых зонах полупроводников, влияют на их электрич. свойства: они определяют изгиб зон у поверхности, т. е. работу выхода полупроводника и приповерхностную концентрацию электронов; в тонких образцах паменяется и ср. концентрация электронов, П. с. ответственны за поверхность реконструкцию и рассеяние, приводящие к уменьшению подвижности электронов в приграничных слоях.

Методы исследования. Для определения периода поверхностной структуры используется метод дифракции медленных электронов. Положение атомов на перестройке поверхности измеряются с помощью сканирующего туннельного микроскопа, а также по рассеянию ионов. Тип и концентрация адсорбиров. атомов определяются методами оже-спектроскопии. Сочетание туннельной микроскопии с одноврем. снятием вольт-амперных характеристик туннельного зонда дала возможность определить по отдельности распределение пространственной плотности электронов на П. с., соответствующих заполненным и пустым зонам.

Наиб. прямые методы определения спектра П. с., т. е. зависимости  $\sigma$  ( $k_{\parallel}$ ), основаны на угловой зависимости фотополектронной эмиссии и т. н. инверсионной фотомиссии (излучения, возникающей при захвате электронов из электронного пучка, падающего на поверхность). Первым способом измеряется спектр заполненных П. с., вторым — пустых.

Распределение П. с. по энергии устанавливается по частотной зависимости коэф. отражения или поглощения света, а также по спектрам электронов, неупруго рассеянных поверхностью кристалла. Чтобы отделить вклад П. с. от объёмных, изучается влияние окисления поверхности или адсорбции чужеродных атомов. При оптич. методах исследования вклад объёмных и П. с. определяют по зависимости от поляризации света (угла между вектором поляризации и нормалью к поверхности).

Прямые методы измерения плотности и энергии, спектра П. с., находящихся в запрещённой зоне полупроводника, являются поля эффект (изменение проводимости) и модуляция ёмкости МДП-структуры при изменении напряжения, приложенного между полупроводником и металлом. Этот метод даёт возможность измерить долю заряда на П. с. и в приграничном слое полупроводника при известном изгибе зон у поверхности, определяющем положение П. с. относительно уровня Ферми. Аналогичные результаты дают и измерения изменения работы выхода полупроводника при освещении.

Наряду с электронными П. с. в полупроводниках имеются поверхностные экситоны, волновая ф-ция к-рых также локализована вблизи границы.

Лит.: Тамм И. Э., Über eine mögliche Art der Elektronenbindung an Kristalloberflächen, *Z. Phys.*, 1932, Bd 76, S. 849; Лангмюу, *Z. Sovietet.*, 1932, Bd 1, S. 733; Ржанов А. В., Электронные процессы на поверхности полупроводников, М., 1971; Дависон С., Левин Дж., Поверхностные (Тамм-моушен) состояния, пер. с англ., М., 1973; Нестерев И. Г., Б. А., Сидяго О. В., Физические свойства атомно-чистой поверхности полупроводников, К., 1983. Г. Е. Липус.

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ** — явления, связанные с существованием мефазных грани. В области контакта двух фаз под влиянием разности их молекулярно-силовых полей происходит образование поверхностного слоя, сопровождающегося адсорбцией, возникновением поверхностной энергии, поверхностного напряжения, поверхностного электрч. потенциала и др. спецнфч. поверхностных свойств, любое проявление к-рых относится к П. я. Толщина поверхностного слоя определяется радиусом действия поверхностных сил и радиусом молекулярных корреляций в каждой из фаз; вдали от критич. точки она порядка дес. молекулярных радиусов и сильно возрастает (как и радиус коррел-

ляций) при приближении хотя бы одной из фаз к критич. состоянию.

Поверхностные слои неоднородны в масштабе молекулярных размеров и анизотропны независимо от агрегатного состояния фаз, отличаются от объёмных фаз физ. свойствами (плотностью, вязкостью, поляризуемостью и т. п.), молекулярным строением и хим. составом (в многокомпонентных системах). В поверхностных слоях наблюдаются спецнфч. хим. эффекты (смещение хим. равновесия, изменение констант скоростей хим. реакций), вплоть до изменения валентности (напр., для Sn, Cr). Особыми свойствами обладают и родственные поверхностным слоям малые (хотя бы в одном измерении) объекты — тонкие плёнки и нити, узкие щели и поры, капли, кристаллы и полости микроскопч. размеров. Изучение тонких плёнок и мономолекулярных слоёв даёт сведения о природе межмолекулярной взаимодействия и строения молекулу.

При удалении па поверхности двумерных фазовых переходов, а также при пересечении поверхностей образуются мефазные линии — одномерные аналоги мефазных поверхностей, с существованием к-рых связаны  $n$  и  $e$  и  $\gamma$  и  $e$  —  $\gamma$  в  $l$  и  $e$  и  $\gamma$ . Неоднородная линейная область является одномомерным аналогом поверхностного слоя и обладает линейным натяжением, линейной свободной энергией и т. д. Уд. линейные термодинамич. потенциалы отличаются от поверхностных лишь тем, что относятся к единице длины (измеряются в Дж/м). Линейные явления существенны лишь для очень малых объектов (зародышей двумерных фаз, смазывающих микрокапель и т. п.).

Закономерности П. я. описываются законом Лапласа и ур-нием Юнга (см. Смачивание), а также обобщённым ур-нием адсорбции Гиббса:

$$d\sigma = -\bar{s}dT + (\bar{\gamma} - \sigma) d\bar{\epsilon} - \sum_i \Gamma_i d\mu_i,$$

где  $\sigma$  — работа образования единицы поверхности путём разрезания (см. Поверхностное натяжение),  $\bar{s}$  — уд. поверхностная энтропия (см. Поверхностная энергия),  $\bar{\gamma}$  — тензор поверхностных натяжений,  $\bar{\epsilon}$  — единичный тензор,  $\bar{\epsilon}$  — тензор деформации (символ «:» означает скалярное произведение тензоров),  $\mu_i$  — химические потенциалы молекул (или электрохим. потенциалы ионов),  $\Gamma_i$  — их адсорбции, суммирование производится по всем компонентам, для к-рых возможно равновесие между объёмной фазой и поверхностным слоем. Для жидких поверхностей  $\sigma$  — поверхностное натяжение, а деформат. член отсутствует. Ур-ние адсорбции Гиббса устанавливает связь между важнейшими П. я. — адсорбцией и поверхностной активностью (см. Поверхностно-активные вещества).

Существенное влияние оказывают П. я. на свойства макросистем. Это связано с увеличением поверхности в таких системах, её искривлением и взаимодействием разл. поверхностей друг с другом. Все три фактора характерны для ультрадисперсных (микроретерогенных) систем. Искривление поверхности оказывает влияние на состояние объёмных фаз и порождает капиллярные явления. В гетерогенной системе только с искривлёнными поверхностями уже не действует Гиббса правило фаз в его классич. форме: в такой системе число степеней свободы па единицу меньше числа компонентов и не зависит от числа фаз (в реальных системах не существует ограничений на число дисперсных фаз). Эффект взаимодействия поверхностей выражается в перекрывании поверхностных слоёв и приводит к появлению *раскливающего давления* тонких плёнок, к-рое (при толщ. его аэане) способствует устойчивости дисперсных систем (раскливающее давление определяется как разность внеш. давления па плёнку и давления в объёмной фазе, составленной из компонентов плёнки при тех же, что и в плёнке, значениях темп-ры и хим. потенциалов).

Важную группу П. я. составляют электроповерхностные явления: поверхностная проводимость, поверхностный электрич. потенциал, электронная эмиссия и др. Все они связаны с образованием на межфазной границе *двойного электрического слоя* в результате эмиссии или специфич. адсорбции ионов, а также ориентации диполь в поле поверхностных сил (в случае полярных жидкостей в этом процессе могут играть существенную роль диполь-квадрольные взаимодействия).

К П. я. относятся *коалеска, аблесска, смачивание, смачивочное и моющее действие, трение, пропитка пористых тел*. П. я. влияют на прочность твёрдых тел (напр., адсорбционное понижение прочности — эффект Ребиндера). П. я. играют важную роль в фазовых процессах. На стадии зарождения фаз П. я. создают энергетич. барьер, определяющий кинетику процесса и возможность существования метастабильных состояний, а при контакте массивных фаз регулируют скорость тепло- и массообмена между ними. Провидаемость поверхностных слоёв и плёнок, связанная с их молекулярным строением, обуславливает мембранные явления, особенно важные в биол. системах. П. я. влияют на коррозию, выветривание горных пород, почвообразование, атм. явления и др. естеств. процессы. На использовании П. я. основаны мн. технол. процессы — хим. синтез с применением гетерогенного катализа, поверхностное разделение веществ и флотация, механич. обработка и упрочнение материалов, фильтрация, приготовление порошков, эмulsion, пен и аэрозолей и др. При этом широко применяются поверхностно-активные вещества, регулирующие поверхностное натяжение и свободную поверхностную энергию.

Лит.: Русаков А. И., Фазовые равновесия и поверхностные явления, Л., 1967; Адамсон А., Физическая химия поверхности, пер. с англ., М., 1979; Дерягин Б. В., Чигрина Н. В., Мудлер В. М., Поверхностные силы, М., 1985; Роулисон Дж., Уидом В. М., Молекулярная теория капиллярности, пер. с англ., М., 1986.

**ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС** электромагнитного поля — соотношение, определяющее связь между тангенциальными компонентами комплексных амплитуд гармонич. электрического  $E(r) \exp(i\omega t)$  и магнитного  $H(r) \exp(i\omega t)$  полей на нек-рой поверхности  $S$ . В случае произвольной поляризации поля и ориентации  $S$  П. я. является двумерным тензором второго ранга. Если тангенциальные составляющие полей  $E_{\parallel}$  и  $H_{\parallel}$  перпендикулярны, вводит скалярный П. я.  $Z_0 = E_{\parallel}/H_{\parallel}$ , обладающий многими сходными свойствами с импедансом участка цепи переменного тока. Подробнее см. *Импеданс* (электрич.).

**ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН АНТЕННА** — антенна, в к-рой используется открытая линия передач с замедляющей системой; частный случай *антенны бегущей волны*. Бегущие замедленные волны оказываются «прижатыми» к направляющей поверхности, поэтому их называют *поверхностными* (поперечная составляющая волнового вектора является в таких системах мнимой величиной, т. е. амплитуда поля в направлении нормали к поверхности экспоненциально убывает), поток энергии вдоль поверхности концентрируется вблизи неё.

Конструкции П. в. а. разнообразны: в качестве замедляющих систем используют диэлектрик, металл с диэлектрич. покрытием, ваал. периодич. структуры (ребристые, ленточные, стержневые и т. п.).

В качестве излучателя в П. в. а. используют открытый конец волновода, рупор, диполь и т. п. Напр., известная антенна «волновой канал» — это П. в. а. стержневого типа, возбуждаемая симметричным вибратором. П. в. а. относятся к классу антенн продольного (осевого) излучения: поле в них как бы «срывается» с открытого конца линии передач. Для формирования диаграмм направленности применяют системы с постепенным изменением импедансных свойств поверхности, что одновременно обеспечивает оптимальное согласование с окружающим пространством.

П. в. а. используют на летат. аппаратах и др. подвижных объектах.

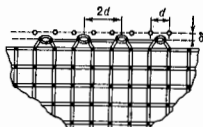
Лит. см. стр. 5. **ПОВЕРХНОСТЬ** — граница раздела между двумя контактирующими средами. В ваал. ситуациях употребляются такие термины: *свободная, или атомно-чистая, П.* (П. твёрдого тела в вакууме, чистая от загрязнений), *покрытая П.* (П. твёрдого тела с адсорбированной на ней определённой плёнкой), *реальная П.* (покрытая в результате пребывания в атмосфере плёнкой неизвестной природы), *межфазная граница, «контакт»* (последний термин обычно относится к границе между конденсиров. средами).

В каждой из контактирующих сред на нек-рое расстояние от П. простирается слой, в к-ром элементный состав и хим. состояние, атомная и электронная структуры и, следовательно, динамич., электронные, магн. и др. свойства вещества существенно отличаются от его свойств в объёме. Толщина этого слоя зависит от природы соприкасающихся сред и внеш. условий и определяется характерной длиной, присущей рассматриваемому физ. явлению (см. *Размерные эффекты, Квантовые размерные эффекты*). Напр., толщина слоя со специфич. электронными свойствами определяется длиной экранирования электрич. поля в среде и заменяется от  $10^{-8}$  см в металлах до величин  $10^{-6} - 10^{-4}$  см и более в полупроводниках, плазме и электролитах (см. *Дебаевский радиус экранирования*).

**Атомная структура поверхностного слоя.** Специфика атомной структуры вблизи свободной П. твёрдых тел проявляется в т. ч. в поверхностных релаксации и реконструкции. При релаксации структура атомных плоскостей, параллельных П., сохраняется такой же, как в объёме, но межслойные расстояния у П. изменяются. Согласно данным, полученным методом *дифракции медленных электронов*, изменение (в большинстве случаев уменьшение) межслойного расстояния у П. металлов обычно не превышает неск. % и охватывает, быстро затухая, лишь 2—3 приповерхностные плоскости.

При реконструкции симметрия решётки в приповерхностной области резко отличается от таковой в объёме (рис.). Это явление характерно в первую очередь для

Атомная структура кристалла с ковалентными связями (двойные линии). Соседние атомы поверхностного слоя (светлые кружки) образуют связи между собой, объединяясь в димеры. При этом на поверхности период решётки равен  $2d$  (реструктуриция —  $2 \times 1$ ). Кроме того, межслойное расстояние уменьшается на величину  $b$  (релаксация).



кристаллов с ковалентной связью (напр., Si и Ge). Вследствие сильно анизотропного характера ковалентного взаимодействия нарушение периодичности решётки при образовании П. влечёт за собой коренную перестройку геометрии межатомных связей у П. Обнаружены также реконструкция П. ряда переходных и благородных металлов. Хотя сам факт реконструкции установлен достоверно, построение детальных моделей поверхностной решётки затруднено ввиду сложности однозначной расшифровки электрограмм (см. *Реконструкция поверхности*).

Особенности атомной структуры характерны также для границ раздела между двумя конденсиров. средами. В пограничном слое жидкости (толщиной  $\sim 10\text{Å}$ ), примыкающем к П. кристалла, имеется повышенная степень порядка по сравнению с ближним порядком в объёме жидкости (см. *Дальний и ближний порядок*). На границе электрод — электролит наблюдается преимуществ. ориентация дипольных молекул, образует слой, экранирующий электрич. поле (см. *Двойной электрический слой*). Протяжённость и строение слоя с особой структурой вблизи контакта двух твёрдых тел

определяется энергией взаимодействия контактирующих атомов или молекул, соотношением периодов кристаллич. рёшеток и их упругими свойствами (см. *Эпиклазия, Гетеропереход*). Структура рёшеток, образующих на П. твёрдого тела адсорбиров. частицами, определяется конкуренцией между атомным потенциальным рельефом П. и взаимодействием между частицами в адсорбиров. плёнке (см. *Адсорбция*).

Поверхностный слой является квазидвумерной системой, в к-рой упорядочение имеет особенности. На П. происходят специфич. структурные фазовые переходы, отражающиеся в изменении различных физ.-хим. свойств П.

Важными разновидностями П. раздела в твёрдых телах являются границы между кристаллич. зёрнами разл. ориентаций (*межзёрные границы*), определяющие мн. характеристики поликристаллич. материалов, а также границы между доменами (*доменные стенки*) в сплавах, магнетиках, *сегнетоэлектриках* и др. объектах, однородных по хим. составу.

Электронные свойства поверхности отличаются от объёмных, в частности наличием электронных *поверхностных состояний*. Соответствующие им волновые ф-ции электронов экспоненциально затухают при удалении от П. Изменение концентрации электронов у П. полупроводников (вследствие их перехода в поверхностные состояния или от одной контактирующей среды к другой) приводит к изгибу энергетич. зон, на чём основано выпрямление тока на контактах металл — полупроводник (см. *Шоттки барьер*) и *p-n-переходы*. Приповерхностный слой может иметь проводимость, значительно превышающую объёмную, а при достаточно сильном изгибе зон изменяется сам характер проводимости и возникает *инверсионный слой*. Вследствие малой толщины проводящего слоя электроны в нём образуют квазидвумерную систему. В таких слоях может достигаться высокая подвижность электронов [ $10^6$  см<sup>2</sup>/(В·с)], в их использование в микроэлектронных приборах позволяет повысить быстродействие и уменьшить рассеиваемую мощность.

В разрешённых энергетич. зонах у П. характерные пиксы плотности электронных состояний обычно уже, чем в объёме, ввиду меньшего числа соседей у поверхностных атомов (см. *Плотность состояний*). Коллективные электронные возбуждения (*плазмоны*) на П. имеют меньшую энергию, чем в объёме (в простейшем случае — в  $\sqrt{2}$  раза), и проявляются, напр., в спектрах потерь энергии электронов, рассеянных в кристаллах.

Распределение электронов вокруг ионных остовов поверхностных атомов асимметрично, что приводит к наличию нек-рого дипольного момента. Связанный с этим двойной электрич. слой вносит существенный вклад в поверхностный потенциальный барьер (см. *Работа выхода*). Электронная структура чужеродных атомов и молекул, адсорбируемых на П., также существенно изменяется. Напр., они могут поляризоваться, приобретая нек-рый электрич. заряд, что приводит к изменению характера их взаимодействия. Вследствие этого внутримолекулярные связи могут быть настолько ослаблены, что происходит диссоциация адсорбиров. молекулы. Эти явления лежат в основе гетерогенного катализа. В процессе десорбции может происходить передача электронов от десорбирующей частицы к П. или в обратном направлении (см. *Поверхностная ионизация*).

**Влияние П. на волновые процессы.** У П. наблюдается особое поведение волн разной природы, происходит преломление и отражение волн, возникают поверхностные волны (у группы, капиллярные, электромагнитные), амплитуда к-рых убывает при удалении от П., а скорость направлена вдоль П. (см. *Поверхностные акустические волны, Волны на поверхности жидкостей*). Поверхностные акустич. волны нашли практич. применение в акустолитропике.

**Атомная динамика П.** Для характеристики тепловых колебаний поверхностных атомов на языке квази-частиц вводится понятие *поверхностных фононов*, отличающихся от объёмных фононов законом дисперсии (их частоты могут, напр., попадать в зоны, запрещённые для объёмных фононов; см. *Колебания кристаллической решётки*). По температурной зависимости интенсивности рассеянных пучков при дифракции медленных электронов найдено, что среднеквадратичная амплитуда тепловых колебаний поверхностных атомов на границе твёрдое тело — вакуум примерно в 1,5—2 раза превышает объёмное значение.

**Оптические свойства П.** Соотношения между амплитудой, фазой и поляризацией падающей, отражённой и преломлённой на П. световых волн определяются *Френеля формулами*. У П. образуются связанные состояния фотонов с поверхностными оптич. фононами, плазмонами и др. дипольно-активными квазичастицами, на к-рые в основном лежат в основе одного из перспективных оптич. методов исследования П. Интенсивность *комбинационного рассеяния света* на молекулах, адсорбированных на металлах, в ряде случаев значительно выше (в  $10^4$ — $10^7$  раз), чем на тех же молекулах в объёмной фазе (гигантское комбинационное рассеяние). Это обусловлено усилением эл.-магн. поля геом. неоднородностями П., а также эфф. передачей энергии от поверхностных электронных возбуждений колебательным модам адсорбиров. молекул. При пересечении П. заряд. частицами наблюдается эл.-магн. *переходное излучение*.

**Магнитные свойства П.** Теория предсказывает отличие намагнитченности поверхностного слоя, а также темп-ры магн. фазовых переходов на П. от соответствующих объёмных значений. Эксперим. исследованием магнетизма П. осуществляются методами дифракции медленных поляризов. электронов, а также с помощью *квантового магнитометра*, чувствительность к-рых достаточна для измерения намагнитченности отд. молекул вещества.

**Массоненосе на П.** происходит при достаточно низких темп-рах быстрее, чем в объёме, поскольку энергия активации *поверхностной диффузии* вследствие большей свободы перемещений частиц обычно в 2—5 раз меньше, чем объёмной диффузии (коэф. диффузии зависит от атомной структуры П. и различен для разных граней кристалла). В процессах поверхностного массоненоса проявляются коллективные эффенты, обусловленные взаимодействием поверхностных частиц и их скоррелиров. движением.

**Поверхностная энергия.** П. обладает нек-рой избыточной поверхностной энергией, т. к. образование П. требует разрыва или перестройки связей между атомами или молекулами в конденсиров. среде. Работа образования единицы площади П. равна уд. поверхностной свободной энергии (поверхностному натяжению). При фазовых переходах 1-го рода, когда в однородной системе начинает выделяться новая фаза, необходимость затрат энергии на образование межфазной П. приводит к явлениям перегрева или переохлаждения (см. *Кинетика, Кристаллизация*).

Равновесное состояние системы конечных размеров определяется (при пост. объёме) минимумом суммарной свободной энергии, в к-рую вносит вклад как объём, так и П., причём относительный вклад П. изменяется обратно пропорц. размеру объекта. Уменьшение поверхностной свободной энергии, происходящее за счёт тех или иных изменений П. (сокращения её площади, понижения энергии в результате насыщения свободных связей поверхностных атомов и молекул и т. д.), служит движущей силой таких поверхностных явлений, как адсорбция, смачивание, растекание, *адгезия* и *коагуляция*, *коагуляция акустическая*, образование капель, *капиллярные явления* и др. Эти явления находят практич. применение в разнообразных технологиях. Напр., ис-

подлежит то обстоятельство, что в результате адсорбции изменяются как свойства адсорбированных частиц (см. выше), так и свойства подложки: работа выхода и определяемые ею эмиссионные характеристики, скорость испарения вещества подложки, хим. активность П. по отношению к разл. реакциям. В веществах, у к-рых адсорбция уменьшает поверхностную энергию, облегчается образование дефектов, тем самым повышается прочность твердых тел (см. *Рейбиндера эффект*). Адсорбция стимулирует также образование эмульсий и пен (см. *Поверхностно-активные вещества*).

Экспериментальные методы, дающие информацию о поверхностных явлениях на атомном уровне, разнообразны. Это автоматизированная микроскопия (см. *Ионный проектор*), дифракция электронов, инфракрасная спектроскопия, ионная спектроскопия, комбинационное рассеяние света, оже-спектроскопия, сканирующая туннельная микроскопия, термодесорбц. спектроскопия, фотомикроаналитическая спектроскопия, электронная микроскопия, электрон-фотонная спектроскопия, галлюциметрия и др. Эти методы позволяют решать мн. практически важные задачи в области электроники, роста кристаллов, вакуумной техники, катализа, повышения прочности материалов и их обработки, борьбы с коррозией и трением и т. д. Т. к. роль П. особенно велика для частиц малых размеров и тонких пленок, то исследование поверхностных явлений приобрело особо важное значение для развития *микромеханики*.

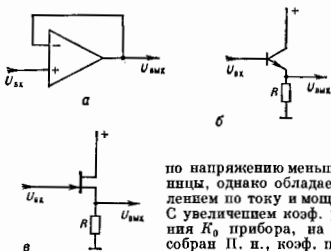
Лит.: Новое в исследовании поверхности твердого тела, под ред. Т. Дняльвейдья, Р. Ванселова, пер. с англ., в. 1—2, М., 1977; Болышов И. А. и др., Сульфидоносные пленки на поверхности металлов, «УФН», 1977, т. 122, с. 125; Методы анализа поверхностей, под ред. А. Зандерны, пер. с англ., М., 1979; Адамсон А. А., Физическая химия поверхностей, пер. с англ., М., 1979; Электронная и ионная спектроскопия твердых тел, под ред. И. Фирзенца, пер. с англ., М., 1981; Нестеренко В. А., Сивитко О. В., Физические свойства атомно-ионной поверхности полупроводников, К., 1983; Зенгунгу И. З., Физика поверхности, пер. с англ., М., 1980.

А. Г. Пауменов.

**ПОВОРОТНОЕ УСКОРЕНИЕ** — то же, что *Кориолиса ускорение*.

**ПОВОРОТНЫЕ ИЗОМЕРЫ** — изомеры молекул, отличающиеся поворотом атомных групп вокруг простых (одинарных) связей. См. *Изомерия молекул*.

**ПОВТОРИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ** — усилитель электрических колебаний, охватывающий т. н. 100%-ной отрицательной обратной связью, в к-ром выходящее напряжение полностью подается на вход в противофазе со входным напряжением. Такая схема имеет коэф. передачи



по напряжению меньше единицы, однако обладает усилением по току и мощности. С увеличением коэф. усиления  $K_0$  прибора, на к-ром собран П. н., коэф. переда-

чи П. п.  $K$  приближается к единице по закону  $K = K_0 / (K_0 + 1)$ . Глубокая обратная связь обеспечивает высокое входное и низкое выходное сопротивление и широкую полосу пропускания П. н., а также снижает искажения сигнала, обусловленные нелинейностью усилительного прибора (т. н. *нелинейные искажения*).

Обычно П. н. строится на одиночных биполярных и полевых транзисторах или на операционных усилителях (см. *Полевой транзистор*, *Транзистор биполярный*).

В последнем случае (рис., а) выход соединяется с инвертирующим входом, а входной сигнал подается на неинвертирующий вход (с л. д. я. ц. и й усилителя). В П. н., выполненных на одиночных транзисторах, выходное напряжение снимается с сопротивления  $R$ , включенного в цепь эмиттера биполярного или в цепь истока полевого транзистора. Соответствующие схемы наз. эмиттерным и истоковым повторителями (рис., б и в). Напряжения база — эмиттер и затвор — исток, управ. яющие выходным током транзистора, равны разности входного и выходного напряжений. Эмиттерный повторитель обладает более низким выходным сопротивлением, чем истоковый, и его коэф. подачи ближе к единице, однако входное сопротивление истокового повторителя значительно выше.

П. н. используются для развязки и согласования отд. узлов электронных устройств, в качестве входных каскадов радиоприемных и т. п. Большая полоса пропускания обуславливает широкое применение эмиттерных и истоковых повторителей в ВЧ-схемах.

Лит.: Титенко У. Шенк К., Полупроводниковая схемотехника, пер. с нем., М., 1982; А. В. Степанов, **ПОГЛОЩАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ** — способность поглощаемого телом потока излучения к падению на него монохроматич. потока излучения к падающему; то же, что монохроматический коэффициент поглощения. П. с. зависит от вещества, из к-рого тело состоит, от формы тела и от его темп-ры. Если П. с. тела в нек-ром диапазоне частот и темп-р равно 1, говорят, что оно при этих условиях является абсолютно черным телом. П. с. наряду со спектральной испускательной способностью входит в Кирхгофов закон излучения и характеризует отклонение поглощающих свойств данного тела от свойств абсолютно черного тела. П. с. — важная характеристика теплового излучения. Сумма П. с., пропускания, коэффициента и отражения коэффициента, табл. 1.

Лит.: Лангабегер Г. С., Олтман, 5 изд., М., 1976. А. И. Гагарин.

**ПОГЛОЩЕНИЕ ВОЛН** — превращение энергии волны в др. виды энергии в результате ее взаимодействия с др. волнами или со средой, в к-рой она распространяется, или с телами, к-рые расположены на пути ее распространения. В зависимости от природы волн и свойств среды механизм П. в. может быть различным (напр., при поглощении звука и поглощении света), но во всех случаях П. в. приводит к ослаблению интенсивности волны. Ославление волн при распространении может быть вызвано не только собственно поглощением, но и др. явлениями, при к-рых энергия падающей волны переходит в энергию др. типов волн, возникающих под действием падающей волны (напр., при рассеянии волн).

**ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА** — явление необратимого перехода энергии звуковой волны в др. виды энергии, в основном в тепло. П. з. обычно характеризуется коэф. П. з.  $\alpha$ , определяемым как обратная величина того расстояния, на к-ром амплитуда звуковой волны падает в  $e$  раз. Амплитуда плоской звуковой волны, бегущей вдоль оси  $x$ , убывает с расстоянием как  $\exp(-\alpha x)$ , а интенсивность — как  $\exp(-2\alpha x)$ . Амплитуда стоячей звуковой волны после выключения источника звука убывает со временем как  $\exp(-\alpha t)$ , где  $c$  — скорость звука,  $t$  — время. Коэф. П. з. выражают в  $m^{-1}$ , т. е. в неперех на метр или же в децибелах на метр (1 дБ/м = 0,115 Нп/м). В гидроакустике часто пользуются единицей дБ/км. П. з. можно характеризовать также коэф. потерь  $\epsilon = \alpha \lambda / \pi$  (где  $\lambda$  — длина звуковой волны) или добротностью  $Q = 1/\epsilon$ . Величина  $\alpha \lambda$  наз. логарифмич. декрементом затухания звука.

При распространении звука в среде, обладающей дивергентной и объёмной вязкостями и теплопроводностью, коэф. П. з. для продольной волны равен

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho c^3} \left[ \frac{4}{3} \eta + \zeta + \kappa \left( \frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (1) \quad 655$$

где  $\rho$  — плотность среды,  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота звуковой волны,  $\eta$  и  $\zeta$  — коэф. сдвиговой и объёмной вязкости,  $\kappa$  — коэф. теплопроводности,  $c_p$  и  $c_v$  — теплоёмкости среды при пост. давлении и объёме соответственно. В области низких частот, где ни один коэф.  $\eta$ ,  $\zeta$  и  $\kappa$  не зависит от частоты, для характеристики П. з. часто пользуются величиной  $\alpha/f^2$ , к-рая в этом случае также не зависит от частоты и является параметром, характеризующим свойства среды. Значение  $\alpha/f^2$ , как правило, в жидкостях меньше, чем в газах, а в твёрдых телах меньше, чем в жидкостях. Выражение (1) для  $\alpha$  применимо только для звуковых волн малой амплитуды. П. з., обусловленное сдвиговой вязкостью и теплопроводностью, наз. классической и характеризуется коэф.  $\alpha_{кл}$ .

Часть коэф. П. з., к-рая пропорц. объёмной вязкости, связана с релаксационными процессами (см. *Релаксация акустическая*). На высоких частотах коэф. объёмной вязкости начинает зависеть от частоты, вследствие чего  $\alpha$  имеет частотную зависимость, отличающуюся от  $\omega^2$ . Коэф. П. з., связанный с релаксацией, имеет вид

$$\alpha_p = \frac{c_{\infty}^2 - c_0^2}{2} \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2)$$

где  $\tau$  — время релаксации,  $c_0$  — скорость распространения звука при малых частотах ( $\omega \tau \ll 1$ ),  $c_{\infty}$  — скорость звука при высоких частотах ( $\omega \tau \gg 1$ ). Полный коэф. поглощения

$$\alpha = \alpha_{кл} + \alpha_p.$$

На низких частотах, т. е. при  $\omega \tau \ll 1$ , коэф. П. з. описывается ф-лой (1), где  $\zeta = \rho \tau (c_{\infty}^2 - c_0^2)$ . Величина  $\alpha_p$  при  $\omega \tau \ll 1$  растёт с увеличением частоты, а на частоте релаксации  $\omega_p = 1/\tau$  имеет максимум (рис. 1).

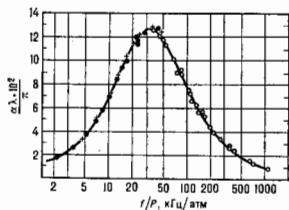


Рис. 1. Зависимость величины  $\alpha$  от  $f/p$  для  $CO_2$  при температуре  $21^\circ C$ .

Величина  $\alpha/f^2$ , постоянная при  $\omega \tau \ll 1$ , в области частот, близких к  $\omega_p$ , уменьшается с ростом частоты, а при  $\omega \tau \gg 1$  стремится к нулю, причём  $\alpha_p$  стремится к пост. величине  $(c_{\infty}^2 - c_0^2)/2c_0^2$ . Релаксационное поглощение всегда сопровождается дисперсией звука.

Релаксация связана с разл. внутримолекулярными и межмолекулярными процессами, происходящими в среде под действием УЗ, поэтому анализ частотных и температурных зависимостей коэф. П. з. позволяет судить об этих процессах. Частота релаксации  $\omega_p$  для равных веществ может лежать как в ультразвуковой, так и в гиперзвуковой области; величина её зависит от темп-ры, давления, примесей др. веществ и от др. факторов. Исследованиями поглощения и скорости звука в зависимости от частоты, темп-ры, давления, концентрации примесей и др. физ. величин занимается *молекулярная акустика*.

П. з. в газах. Теплопроводность и сдвиговая вязкость в газах дают вклад в П. з. одного порядка величины. Вклад объёмной вязкости и релаксационных процессов значителен для многоатомных газов, тогда как в одноатомных газах релаксационные процессы отсутствуют и  $\alpha = \alpha_{кл}$ . Данные о П. з. в жидк-ых газах в УЗ-диапазоне частот приведены в табл. 1.

Табл. 1. — Поглощение ультразвука в газах

Газ	Частота $f$ , кг/с	Давление $p$ , атм.	$\alpha/f^2 \cdot 10^{11}$ , м <sup>-1</sup> с <sup>2</sup>	
			эксперимент	теория (классическая)
Воздух	132—400	1,0	2,94—3,99	1,24
	1160	1,0	1,67	1,30
Углекислый газ	304,4	0,98	27,1	1,30
Нитрог.	598,4	1,0	3,58	0,17
Оксиг. азота	598,9	0,95	1,83	1,56
Кислород	598,9	0,99	1,68	1,49
Аргон	425,0	1,0	1,9	1,9
Азот	598,9	0,97	1,35	1,3

Из табл. видно, что в ряде случаев измеренные значения П. з. заметно превышают  $\alpha_{кл}$ . Это указывает на существенный вклад релаксационных процессов. П. з. в  $CO_2$  довольно велико (рис. 1), напр. на частоте 50 кг/с при комнатной темп-ре и нормальном давлении величина  $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>-1</sup>, т. е. волна затухает в  $e$  раз на расстоянии 5 см.

В газах произведение П. з. на длину волны ( $\alpha \lambda$ ) при заданной темп-ре зависит не только от частоты, но и от давления в газе  $p$ , т. е. от отношения  $f/p$ , поскольку время релаксации в газах обратно пропорц. числу соударений молекул, а следовательно, давлению газа  $p$ .

В таких газах, как  $CO_2$ ,  $CS_2$ ,  $CO$  и др., осн. вклад в П. з. даёт релаксационный процесс возбуждения колебат. степеней свободы. В более сложных системах может иметь место как колебательная, так и вращат. релаксация, причём обычно частоты релаксации этих процессов различаются на неск. порядков.

Примеси посторонних газов заметно влияют как на величину  $\alpha_p$ , так и на  $\omega_p$ . П. з. в воздухе зависит от его влажности (рис. 2). В воздухе на частотах ниже 1 МГц

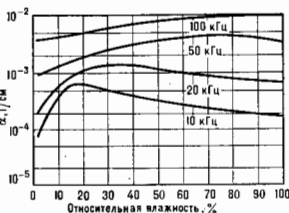


Рис. 2. Зависимость  $\alpha$  в воздухе от относительной влажности при различных частотах.

осн. вклад в П. з. даёт колебат. релаксация молекул  $O_2$  и  $H_2$ . В сильно разреженных газах, т. е. при больших значениях отношений  $f/p$ , когда длина волны звука становится сравнимой с длиной свободного пробега молекул, для описания П. з. нужно пользоваться кинетич. теорией газов.

При распространении звука в помещениях, сосудах и трубах на П. з. в среде накладывается поглощение в пограничном слое, к-рое пропорц. величине  $1/\delta^2$ , где  $\delta = \sqrt{2\eta/\rho\omega}$  — глубина проникновения вязкой волны. В малых объёмах поглощение и пограничного слоя может оказаться преобладающим.

П. з. в жидкостях. П. з. в обычных жидкостях в основном определяется вязкостью (как сдвиговой, так и объёмной). В большинстве жидкостей эксперим. значения коэф. П. з. существенно превышают значения, даваемые классич. теорией, что свидетельствует о большом вкладе релаксационных процессов. Релаксационное поглощение в жидкостях может быть обусловлено колебат. релаксацией, структурной релаксацией (ассоцииров. жидкости, поведение к-рых похоже на поведение воды), поворотной-изомерной релаксацией, диссоциацией растворённых веществ в растворах электролитов и пр.

В жидкостях частота релаксации, как правило, очень велика, поэтому область релаксации часто оказывается лежащей в диапазоне гиперзвуковых частот. В этих случаях при  $\omega \ll \omega_r$  релаксационные процессы приводят к большим значениям  $\alpha$  и существенным отклонениям от классич. значений  $\alpha_{\text{кл}}$  (табл. 2), по качеству.

Табл. 2.—Теоретические и экспериментальные значения поглощения ультразвука в жидкостях

Жидкость	Частота $f$ , МГц	$\alpha/f^2 \cdot 10^{14}$ , м <sup>-1</sup> с <sup>2</sup>	
		эксперимент	теория (классическая)
Вода	1-250	23	8,5
Ацетон	6-70	30	7,0
Толуол	1-75	80	7,8
Четырёхлопастный углерод	1-100	500	20,0
Уксусная кислота	1,5-67,5	9000-158	17
Глицерин (30°C)	22,3	2730	1600
Этиловый спирт	1-220	55	20
Ртуть	21-998	12-13	10,3
Аргон (-187,8°C)	44,4	10,1	8,1

характер частотной зависимости  $\alpha \sim f^2$  сохраняется до высоких УЗ-частот. Коэф. поглощения в жидкостях обычно сильно зависит от темп-ры (рис. 3).

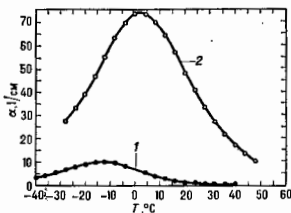


Рис. 3. Зависимость  $\alpha$  от температуры для жидкостей (гексастирола) со структурной единицей релаксацией: 1 — для 3 МГц; 2 — для 22 МГц.

Температурные кривые поглощения имеют максимум, величина и положение которого зависит от частоты: с увеличением частоты максимум сдвигается в сторону больших темп-р и величина  $\alpha$  растёт, что свидетельствует об увеличении времени релаксации при повышении темп-ры.

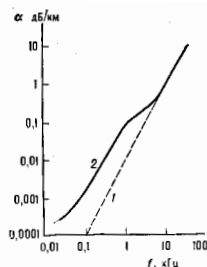
П. з. в растворах электролитов связано с хим. релаксацией и диссоциацией растворённых веществ. П. з. в морской воде довольно велико, оно заметно превышает поглощение в пресной воде. Это связано с двумя релаксационными процессами и зависит от солёности и темп-ры морской воды: на частотах от 10 до 100 кГц преобладает поглощение, обусловленное релаксацией солей сульфата магния, а на частотах ниже 10 кГц вклад в поглощение даёт релаксация солей борной кислоты. На низких частотах (0,1-3 кГц) для расчёта  $\alpha$  морской воды можно пользоваться приближённой эмпирич. ф-лой

$$\alpha = \frac{0,11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2}$$

где  $f$  — частота в кГц,  $\alpha$  — в дБ/км. В области частот 5-60 кГц для качества оценок поглощения иногда пользуются зависимостью  $\alpha \approx 0,036 f^{1/2}$ , где частота  $f$  в кГц,  $\alpha$  в дБ/км. Измерение значения П. з. в море на НЧ часто заметно превышает расчётные (рис. 4).

В жидкостях с пузырьками газа П. з. имеет резонансный характер. Добавка к коэф. П. з., обусловленная пузырьками газа, равна  $\alpha_{\text{п}} = 4,34/\sigma_{\text{п}}N$  дБ/длина, где  $N$  — число пузырьков в единице

Рис. 4. Поглощение звука в морской воде: 1 — расчётное релаксационное поглощение; 2 — измеренные значения.



объёма,  $\sigma_{\text{п}}$  — сечение рассеяния одиночного пузырька. Для пузырьков одного размера с радиусом  $a$

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{4\pi a^2 k}{[(\omega/\omega_r)^2 - 1]^2 + \delta^2}$$

где  $k$  — волновое число в жидкости,  $\delta$  — величина, характеризующая потери в пузырьке газа. Резонансная частота пузырька с радиусом  $a$  равна  $\omega_r = \frac{1}{a} \left( \frac{3P_0 \gamma}{\rho_0} \right)^{1/2}$ , где  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  для газа,  $P_0$  и  $\rho_0$  — давление и плотность жидкости. Отсюда видно, что когда частота звуковой волны совпадает с резонансной частотой пузырька, П. з. резко увеличивается. Полное поглощение в среде с пузырьками газа представляет собой сумму коэф. поглощения для чистой жидкости и величины  $\alpha_{\text{п}}$ .

В высокополимерах, резинах и пластмассах П. з. сильно зависит от состава и структуры материала. В этих веществах определяющий вклад в П. з. вносят релаксационные процессы, причём, как правило, имеется широкий спектр времён релаксации. Под действием УЗ-волны происходит сворачивание и разворачивание клубков молекул полимеров. Область релаксации для разных материалов может лежать как в низкочастотном, так и в меггерцевом диапазонах частот. Зависимость  $\alpha$  от темп-ры имеет один или неск. максимумов, положение которых зависит как от материала, так и от частоты звука. С ростом частоты положение максимумов сдвигается в сторону больших темп-р. Для вулканизиров. резины при частоте 10 МГц имеется максимум при темп-ре  $\approx 40^\circ\text{C}$ , в полистироле — при темп-ре порядка  $-10^\circ\text{C}$ . Величина коэф. П. з. в резине при  $f = 40$  МГц составляет неск. сотен дБ/см.

Величина П. з. в веществах биол. происхождения имеет большой разброс, т. к. зависит от способа приготовления образца, условий и метода измерения. Некоторые данные приведены в табл. 3 и на рис. 5. В биол. тканях часто бывает трудно отделить истинное П. з. от др. механизмов, приводящих к уменьшению амплитуды звука.

Табл. 3.—Поглощение ультразвука в биологических средах

Биологическая среда	$\alpha$ , см <sup>-1</sup>	
	при $f=1$ МГц	при $f=3$ МГц
Кровь	0,023	0,087
Жир	0,044-0,09	0,076-0,46
Кость	0,14-0,66	0,3-1,2
Хрящ	0,58	1,44
Кость черепа	1,5-2,2	8-20
Лёгкое	3,5-5	3,6-8,8

П. з. в твёрдых телах. В твёрдых телах П. з. различно для продольных и сдвиговых волн. Это связано как

с различием скорости звука для этих волн, так и с тем, что в П. з. для продольной и сдвиговой волн могут давать вклад разл. механизмы. Для определения  $\alpha$  в твёрдом теле, как правило, ф-лой (1) не пользуются,

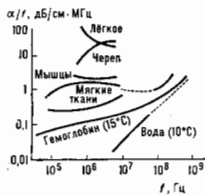


Рис. 5. Поглощение звука в тканях биологического происхождения.

т. к. в этом случае П. з. может определяться механизмами, не укладывающимися в простую схему, на основании к-рой выведена эта ф-ла. П. з. в твёрдых телах вызывается в основном внутренним трением и теплопроводностью среды, а на ВЧ и при низких темп-рах — разл. процессами взаимодействия УЗ- и гиперзвуковых волн с возмущениями в твёрдом теле, такими, как тепловые колебания решётки (фононы), электроны, спиновые волны и пр. На поглощение сдвиговых волн в однородных твёрдых телах теплопроводность и др. объёмные эффекты не влияют, т. к. сдвиговые волны не связаны с изменением объёма.

П. з. в твёрдом теле зависит от кристаллич. состояния вещества (в монокристаллах коэф. П. з. обычно меньше, чем в поликристаллах), от наличия дефектов и примесей, от предварит. обработки, к-рой был подвергнут материал (для металлов — ковка, прокат, отжиг, закалка) и т. п. Внутр. трение в кристаллах при комнатной темп-ре сильно зависит от наличия дислокаций. Под действием звука в кристалле возникают переменные упругие напряжения, к-рые возбуждают колеб. движения дислокаций. Взаимодействие этих колебаний с фононами решётки приводит к доп. П. з. Различаются три осн. механизма дислокац. П. з.: струнный, при к-ром дислокация рассматривается как струна длиной  $l$ , закрепленная в двух точках и колеблющаяся под действием звука в вязкой среде (рис. 6, а); гистерезисный, обусловленный отрывом дислокаций от их точек закрепления при больших амплитудах колебаний (рис. 6, б, в); релаксационный, связанный

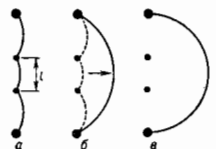


Рис. 6. Положение дислокационной линии под действием механических напряжений в звуковой волне: а — струна длиной  $l$  колеблется в вязкой среде; б и в — отрыв дислокаций от точек закрепления при больших амплитудах механических напряжений.

с дефектами, возникающими в самом процессе деформации и проявляющийся гл. обр. в металлах с гранецентрир. решёткой — меди, свинец, никель и др.

Дислокац. П. з. зависит от амплитуд звуковой волны. Изучение дислокац. поглощения позволяет исследовать дислокац. структуру кристалла и её изменение при различных внеш. воздействиях — нагревании, ковке, прокате, ионизирующих излучениях и др.

Во мн. твёрдых телах при не очень высоких частотах коэф. П. з. изменяется пропор. частоте и поэтому вычисл. добротности  $Q$  от частоты не зависит. В табл. 4 приведены значения  $\epsilon = 1/Q$  для нек-рых материалов.

Т а б л. 4. — Поглощение ультразвука в твёрдых телах

Материал	Диапазон частот $f$	Коэффициент потерь $10^4 \epsilon$	Тип волны
Плавленый кварц	5—19 МГц	0,225	сдвиговая
Алюминий поликристаллический	3,5—1,5 МГц	0,515	продольная
Свинец	3,1—7,5 МГц	1,7	продольная
	1,6—15 кГц	280	сдвиговая
Стекло крон.	1,0—8 кГц	290	сдвиговая
Нержавеющая сталь	4—7,5 МГц	2,38	сдвиговая
1X1 8Н9Т	18—25 кГц	4,4	продольная
Титан ВТ1	18—25 кГц	1,4	продольная
Медь М5	—	5,2	продольная
Латунь Д55	—	2,4	продольная
Алюминиевый сплав АМГ	—	3,0	продольная

Роль теплопроводности для продольных волн в однородном твёрдом теле идентична роли теплопроводности в жидкости и газе. Вклад теплопроводности составляет примерно половину от полного поглощения в металлах, в к-рых велики коэф. теплового расширения и теплопроводности, и всего лишь неск. процентов от полного поглощения в диэлектриках.

Другой механизм поглощения, также имеющий место в большинстве веществ, связан с нелинейным взаимодействием звуковой волны и тепловых колебаний кристаллич. решётки, т. е. с взаимодействием звуковых и тепловых фононов. Такое П. з. поэтому часто наз. «решёточным» или «фононным». Оно проявляется на ВЧ в достаточно чистых и бездефектных кристаллах. В зависимости от частоты и соотношения длины волны УЗ и длины свободного пробега тепловых фононов в кристалле (определяемой темп-рой) рассматриваются разл. модели фононового поглощения. На сравнительно низких частотах действует т. п. механизм Ахиезера. Он заключается в том, что звуковая волна, представляющая собой когерентный пучок фононов, нарушает равновесное распределение тепловых фононов, и вызванное ею перераспределение энергии между фононами приводит к необратимому процессу диссипации энергии. Этот механизм имеет релаксацион. характер, причём роль времени релаксации играет время жизни фонона, равное  $\tau = l/c = 3kT/c^2$ , где  $l$  — длина свободного пробега фонона,  $\bar{c}$  — средняя скорость звука. В этом случае коэф. П. з.

$$\alpha = 1,4c_T \gamma T^2 \frac{\omega^2 \tau}{\rho c^2 (1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (3)$$

где  $\gamma$  — постоянная Грюнайсена,  $T$  — абс. темп-ра. Этот механизм П. з. даёт вклад в поглощение как продольных, так и сдвиговых волн. Он является доминирующим при комнатных темп-рах, при к-рых выполняется условие  $\omega \tau \ll 1$ . В области гиперзвуковых частот ( $10^{10}$ — $10^{11}$  Гц) и при низких темп-рах, близких темп-ре жидкого гелия, когда  $\omega \tau \gtrsim 1$ , П. з. является результатом трёхчастичного взаимодействия когерентных звуковых фононов с тепловыми; взаимодействие когерентного и теплового фононов приводит к появлению третьего, также теплового, фонона и, следовательно, с учётом законов сохранения энергии и импульса — к уменьшению звуковой энергии, т. е. к П. з. Этот механизм поглощения наз. механизмом Ландау — Румера.

Решёточное П. з. является осн. механизмом поглощения в чистых бездислокац. кристаллах диэлектриков, в к-рых др. механизмы проявляются слабо. Такие кристаллы могут обладать очень малым коэф. П. з.; так, весьма малое поглощение при комнатной темп-ре было обнаружено в топазе, берилле, сапфире (табл. 5). Температурная зависимость коэф. П. з. в диэлектриках имеет характерный вид, показанный на рис. 7 для кристалла  $Al_2O_3$ .

Табл. 5. — Поглощение звука в некоторых кристаллах

Кристалл	Направление распространения	Тип волны	T, K	$f$ , ГГц	$\alpha$ , дБ/м
Кварц	ось X	продольная	300	1	500
	—а—	поперечная	300	1	500
	—а—	поперечная медленная	300	1	80
Санфир	ось Z	продольная	300	1	50
	ось C	—а—	300	1	109
	—а—	—а—	300	9	$1,5 \cdot 10^3$
Рутил	ось C	продольная	300	1	150
	—а—	—а—	20	1	30
Железистый гранат	[100]	поперечная	300	1	34
	—а—	—а—	300	9	$2,5 \cdot 10^3$
Алюмоитный гранат	[100]	продольная	300	9	20
	—а—	—а—	300	9	$2,5-3,0 \cdot 10^3$
Берилл	ось C	продольная	300	9	$1,5 \cdot 10^3$
Нюобат лития	ось C	продольная	300	1	30
	—а—	—а—	300	9,4	$2,7 \cdot 10^3$

При темп-рах  $T \leq 40$  К коэф. П. з. не зависит от темп-ры; в интервале темп-р 20—100 К имеется область резкого возрастания коэф. П. з., где зависимость  $\alpha$  от  $T$  для разных кристаллографич. ориентаций изменяется от  $\alpha \sim T^4$  до  $\alpha \sim T^2$ ; при темп-рах выше 100 К коэф. П. з. вновь почти не зависит от  $T$ . Такой ход  $\alpha(T)$  можно объяснить соответствующей зависимостью для  $c_{ij}$  и  $k$  в ф-ле (3).

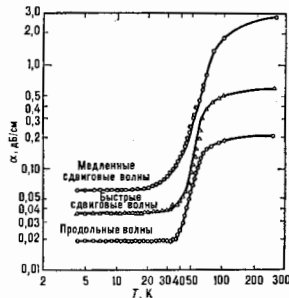


Рис. 7. Зависимость  $\alpha$  в монокристалле  $Al_2O_3$  от темп-ры для продольных и спиговых ультразвуковых волн с частотой 1 ГГц, распространяющихся вдоль оси C.

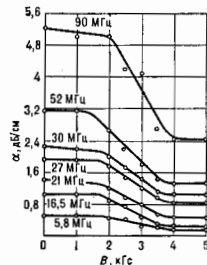
П. з. в монокристаллах зависит от направления распространения волны относительно кристаллографич. осей и от наличия примесей. Последние могут не только изменять величину коэф. П. з., но и влиять на характер его зависимости от  $T$ . Напр., в кварце наличие примесей приводит к появлению пиков на зависимости  $\alpha(T)$ . Коэф. П. з. в синтетич. кварце при нек-рых темп-рах может на 2—3 порядка превышать коэф. П. з. в натуральном кварце.

В металлах и полупроводниках кроме решеточного П. з., описанного выше, а также П. з., обусловленного теплопроводностью и внутр. трением, имеется ещё спещифич. поглощение, связанное с взаимодействием УЗ

с электронными проводимости (см. *Акустическое взаимодействие*). В металлах эти эффекты становятся заметными при темп-рах ниже примерно 10 К. При переходе металла в сверхпроводящее состояние П. з. уменьшается, а при наложении магн. поля, разрушающего сверхпроводимость, поглощение возрастает. Взаимодействие акустич. волны с носителями тока в полупроводнике при наличии внеш. электрич. поля может привести к появлению отрицат. П. з., т. е. к усилению звука.

В ферромагнетиках имеется дополнит. П. з., обусловленное эффектом *магнитоупругости*. Под действием упругой волны в них возникает локальная переменная намагниченность и связанные с ней потери энергии, в первую очередь на токи Фуко и магн. гистерезис. Эти потери, вызывающие П. з., зависят от частоты. Зависимость магнитоупругостных и магн. характеристик вещества от состояния намагниченности также влияет на П. з. (рис. 8). В частности, при наложении внеш. магн. поля коэф. П. з. уменьшается, а с ростом частоты растёт. В нек-рых веществах взаимодействие акустич.

Рис. 8. Зависимость  $\alpha$  различных частот в смысле от магнитной индукции  $B$  при распространении вдоль осей [110].



волны с системой ядерных спинов или же с электронными спинами парамагн. центров может приводить к резонансному П. з. (см. *Акустический парамагнитный резонанс*, *Акустический ядерный магнитный резонанс*).

В поликристаллах как величина коэф. П. з., так и его частотный ход зависит от соотношения между размерами кристаллита  $a$ , длиной тепловой волны  $\lambda = \sqrt{\chi/\rho}$  и длиной волны звука  $\lambda$ . При низких частотах ( $\omega \ll \chi/a^2$ , где  $\chi = \kappa/\rho c_p$  — коэф. температуропроводности)  $\alpha \sim \omega^2$ . На ВЧ, т. е. при  $\omega \gg c/a$ , снова  $\alpha \sim \omega^2$ , а в области частот  $\chi/a^2 \ll \omega \ll c/a$  коэф.  $\alpha \sim \sqrt{\omega}$ . Аналогичный характер имеет поглощение поперечных волн в тонких пластинках и стержнях, где толщина пластинки играет ту же роль, что и размеры кристаллита в поликристаллах.

При фазовых переходах 2-го рода П. з. аномально возрастает с приближением темп-ры к темп-ре перехода  $T_c$ , что связано с ростом термодинамич. флуктуаций. С ростом интенсивности звука становятся существенными нелинейные эффекты, к-рые приводят к зависимости коэф. П. з. от амплитуды (см. *Нелинейная акустика*).

Методы измерения П. з. разнообразны и зависят от вещества, в к-ром П. з. измеряется, от диапазона частот и величин коэф. П. з. Во всех методах измерений важно выделить истинное поглощение и отделить его от др. явлений, приводящих к уменьшению амплитуды звука, таких, как сферич. расхождение, дифракц. эффекты, рассеяние, а также потери на склейках и пр.

Лит.: Гандау Л. Д., Диффиц Е. М., Механика сплошных сред, 2 изд., М., 1954; Алфре Я. Т., Механические свойства высокополимеров, пер. с англ., М., 1952; Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике, пер. с нем., 2 изд., М., 1957; Herzfeld K., Litovitz T.,



Absorption and dispersion of ultrasonic waves, N. Y., 1959; М. и Х. Г. Солдатов, В. Н. Сыржук, Ю. П. Основы молекулярной акустики, М., 1964; Физическая акустика, под ред. У. Маона, пер. с англ., т. 1, ч. А, М., 1966, гл. 4; т. 2, ч. А, М., 1968; т. 3, ч. В, М., 1968, гл. 5 и 6; т. 4, ч. В, М., 1970, гл. 2; Косилкин А. Б., Ультразвуковые измерения, 2 изд., М., 1982; Труалл Р., Эльбаум Ч., Чик Б., Ультразвуковые методы в физике твердого тела, пер. с англ., М., 1972; Weils P. N., T., Вестфалинский университет, Ланца, 1977; Келья К., Медлен Т., Акустическая океанография, пер. с англ., М., 1980; Кривяков В. А., Крылов В. В., Введение в физическую акустику, М., 1984. А. Л. Полякова.

**ПОГЛОЩЕНИЕ РАДИОВОЛН** — превращение энергии эл.-магн. волны радиодиапазона при распространении в среде в др. виды энергии. Различают нерезонансное и резонансное П. р. Резонансное П. р. — преобразование энергии радиоволны в тепловую энергию среды. При резонансном П. р. энергия радиоволны расходуется на переходы молекул вещества в более высокие энергетич. состояния.

Нерезонансное П. р. может происходить из-за конечной проводимости коаксиальных кабелей, волноводов и т. п. при распространении радиоволн в фидерных СВЧ-линиях питания приёмно-передающего оборудования (см. *Волновод металлопластиковый*); из-за конечной проводимости земной поверхности при распространении *земной волны* (см. *Распространение радиоволн*); за счёт затрат энергии радиоволны на преодоление взаимного трения молекул газа, обладающих электрич. и магн. моментами, и частиц гидрометеороидов (дождя, града и т. п.) при распространении волн в тропосфере; из-за трения электронов, находящихся под воздействием эл.-магн. поля радиоволны, с ионами и нейтральными частями плазмы при распространении волн в ионосферной и космич. плазме. Резонансное П. р. в тропосфере обусловлено переходом молекул газа в более высокие энергетич. состояния за счёт энергии радиоволны. Оно достигает максимума при совпадении частоты волны с одной из частот разрешённых квантовых переходов (см. *Квантовая электродинамика, Радиоспектроскопия*).

Поглощение приводит к ослаблению радиоволн. При распространении земной волны такое ослабление практически отсутствует для сверхдлинных волн и растёт с увеличением частоты волны. В тропосфере П. р. проявляется на частотах выше 10 ГГц. При этом осн. поглощение санти- и миллиметровых волн вызывают кислород (резонансные полосы поглощения вблизи частот 60 и 120 ГГц) и водяной пар (полосы поглощения вблизи 22 и 183 ГГц). П. р. в околоземной плазме иррегулярно мало на частотах выше 100 МГц. Для коротких и средних радиоволн (КВ и СВ) осн. поглощение происходит в D слое ионосферы. Наб. сильно поглощение КВ проявляется в высоких широтах во время геофиз. возмущений. Поглощение сверхдлинных радиоволн (СДВ) зависит от состояния нижней ионосферы: при сравнительно слабых ионосферных возмущениях П. р. растёт с ростом возмущения, а при более интенсивных возмущениях оно может уменьшаться (см. *Сверхдлинные волны*). Особо следует отметить нерезонансное поглощение мощных радиоволн при распространении в ионосферной плазме, когда возможно как увеличение, так и уменьшение П. р. с ростом мощности радиоволн.

П. р., вызывая ослабление радиоволн, может отрицательно сказываться на работе систем радиосвязи, радионавигации и т. н. (напр., во время сильных магн. бурь в полярных районах аномальное поглощение КВ может приводить к нарушению коротковолновой радиосвязи в течение неск. суток). Для уменьшения П. р. в фидерных СВЧ-линиях приходится применять слабопоглощающие диэлектрики, радиоволноводы с покрытиями из высокопроводящих металлов (Ag, Au) и т. п. Но в ряде случаев П. р. играет и положительную роль. Явление П. р. широко используется в радиоспектроскопии, при исследовании природных ресурсов Земли, околоземного и космич. пространства радиодиф. мето-

дами. Свойства нек-рых материалов (напр., графита) эффективно поглощать радиоволны используются при изготовлении отд. узлов СВЧ-радиоаппаратуры (аттенуаторов, неотражающих нагрузок и т. н.).

Лит. см. при ст. *Распространение радиоволн*.

В. А. Алимов.

**ПОГЛОЩЕНИЕ СВЁТА** — уменьшение интенсивности оптич. излучения при прохождении через к.-л. среду за счёт взаимодействия с ней, в результате к-рого световая энергия переходит в др. виды энергии или в оптич. излучение др. спектрального состава. Осн. законом П. с., связывающим интенсивность  $I$  пучка света, прошедшего слой поглощающей среды толщиной  $l$  с интенсивностью падающего пучка  $I_0$ , является закон Бугера  $I = I_0 \exp(-k_l l)$ . Не зависящий от интенсивности света коэф.  $k_l$  как показатель поглощения, причём  $k_l$  как правило, различен для разных длин волн  $\lambda$ . Этот закон был экспериментально установлен П. Бугером (P. Bouguer, 1729) и впоследствии теоретически выведен И. Ламбертом (J. H. Lambert, 1760) при очень простых предположениях, что при прохождении любого слоя вещества интенсивность светового потока уменьшается на определённую величину, зависящую только от  $k_l$  и толщины слоя  $l$ , т. е.  $dI/I = -k_l dl$ . Решением этого ур-ния и является *закон Бугера — Ламберта — Бера закон*. Физ. смысл его состоит в том, что сам процесс потери фотонов пучка в среде, характеризуемый  $k_l$ , не зависит от их плотности в световом пучке, т. е. от интенсивности света, и от толщины поглощающего слоя  $l$ . Это справедливо при не слишком больших интенсивностях излучения (см. ниже).

Зависимость  $k_l$  от длины волны света  $\lambda$  называется спектром поглощения вещества. Спектр поглощения изолир. атомов (напр., разреженные газы) имеет вид узких линий, т. е.  $k_l$  отличен от нуля только в нек-рых узких диапазонах длин волн (сотые — тысячные доли нм), соответствующих частотам собств. колебаний электронов внутри атомов. Спектр поглощения молекул, определяемый колебаниями атомов в них, состоит из существенно более широких областей длин волн (т. н. *полосы поглощения*, *десятые доли — сотни нм*; см. *Молекулярные спектры*). Поглощение твёрдых тел характеризуется, как правило, очень широкими областями (сотни и тысячи нм) с большим значением  $k_l$ ; качественно это объясняется тем, что в конденсир. средах сильное взаимодействие между частями приводит к быстрой передаче всему коллективу частиц энергии, отданной светом одной из них.

Качеств. картина процессов взаимодействия излучения с веществом, происходящих на атомном уровне и приводящих к П. с., может быть получена в рамках квазиклассич. подхода. В основе его лежит модель, рассматривающая атомы как совокупность гармонич. осцилляторов: электроны в атомах (молекулах) колеблются около положения равновесия. Такая модель приемлема для разреженных газов и паров металлов, где можно не учитывать влияния соседних атомов. Для жидких и твёрдых тел такая модель непригодна, т. к. поведение электронов, определяющих оптич. свойства атома, резко меняется под действием полей соседних атомов.

Сноптaneous испускание атомов осцилляторной модели соответствует свободным (затухающим) колебаниям электронов. Собств. частоты этих колебаний  $\nu_{nm}$  задаются 2-м постулатом Бора:  $\nu_{nm} = (E_n - E_m)/h$ , где  $E_n$  и  $E_m$  — уровни энергии атома, между к-рыми совершается квантовый переход с испусканием света на частоте  $\nu_{nm}$ .

При распространении в среде света, падающего на неё извне, колебания электронов в атомах носят вынужденный характер и совершаются с частотой падающей световой волны. При таком подходе П. с. связывается с потерями энергии волны на вынужденные колебания электронов. (Энергия, поглощённая атомом, может переизлучаться или переходить в др. виды энер-

гив.) Световое поле  $E = E_0 \exp(i\omega t)$ , падающее на среду, вызывает колебания электронов, описываемые уравнением

$$m_0 \ddot{x} + m_0 \dot{x} + m_0 \omega_{nm}^2 x = e E_0 \exp(i\omega t). \quad (1)$$

Здесь  $m_0$  и  $e_0$  — масса и заряд электрона,  $x$  — его смещение от положения равновесия,  $\omega_{nm} = 2\pi\nu_{nm}$ ,  $\gamma$  — коэф., характеризующий затухание. Первый член в (1) описывает силу инерции, второй —  $m\dot{x}$  — тормозную силу, пропорц. скорости колеб. движения электрона и обуславливающую затухание его колебаний (аналогичную силе трения), третий член — упругую силу, пропорц. смещению электрона от положения равновесия; правая часть уравн (1) — вынуждающая сила. Решение этого уравн

$$x = \frac{e_0 E_0 \exp(-i\omega t)}{m_0 \left[ (\omega_{nm}^2 - \omega^2) - i\gamma\omega \right]}$$

при ненулевом  $\gamma$  есть величина комплексная, что и свидетельствует о поглощении энергии волны атомом. При комплексной связи вынуждающей силы и отклонения электрона комплексными оказываются, соответственно, и интегральные величины: диэлектрич. проницаемость  $\tilde{\epsilon} = \epsilon + i4\pi\sigma/\omega$  ( $\sigma$  — проводимость,  $\epsilon$  — вещественная часть диэлектрич. проницаемости) и показатель преломления  $\tilde{n} = \sqrt{\tilde{\epsilon}} = n - ik$ . Мнимая часть величин  $\tilde{n}$  прямо связана с характеристикой поглощающих свойств среды — показателем поглощения  $k$ :  $k_1 = 2\omega k = 4\pi k \lambda$ . Величина  $k$ , являющаяся, как и  $k_1$ , ф-цией длины волны, наа. главным показателем поглощения. Введение комплексных величин  $\tilde{\epsilon}$  и  $\tilde{n}$  позволило применить формальное описание, разработанное для прозрачных сред, и к поглощающим средам. Именно с поглощением света связана аномальная дисперсия, к-рая имеет место внутри полосы поглощения (см. *Дисперсия света*).

При рассмотрении П. с. с квантовой точки зрения вводится такая характеристика энергии, уровней, как *населенность уровня*  $N_{n,m}$  — число атомов, находящихся в данном энергетич. состоянии. В этом случае выражение для  $k_1$  может быть представлено в виде

$$k_1 = \frac{4\pi e^2 \Delta N_{nm} \omega^2 \nu}{c m_0 \left[ (\omega_{nm}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2 \right]}, \quad (2)$$

где разность населенностей уровней  $n$  и  $m$   $\Delta N_{nm} = N_m - (g_m/g_n)N_n$  (здесь  $g_m$  и  $g_n$  — статистич. веса заселенности уровней). Зависимость  $k_1$  от разности частот  $\omega_{nm} - \omega$  наа. контуром линии поглощения. В рассмотренном случае, приближении ширина линии поглощения на уровне 0,5 от максимума  $2\delta\nu = \gamma/2\lambda$ . Это т. н. естествен. ширина линии. В реальных средах имеется ряд причин, увеличивающих ширину линии поглощения, иногда во много раз. Гл. причиной уширения линии поглощения в газах служит эффект Доплера, возникающий вследствие беспорядочного движения атомов (см. *Уширение спектральных линий*).

При спец. условиях возбуждения возможна т. н. инверсия населенности, когда  $\Delta N_{nm} < 0$ , т. е. когда населенность верхнего уровня больше населенности нижнего. В этом случае, как видно из (2), имеет знак и показатель поглощения  $k_1$  — среда характеризуется т. н. отрицательным поглощением. Свет, проходящий через такую среду, не ослабляется, а, наоборот, усиливается. Среды, в к-рых возможно создание (тем или иным способом) инверсной населенности уровней, используются для создания лазеров и усилителей света.

Поскольку поглощение фотона приводит к переводу атома с нижнего уровня на верхний, то процесс поглощения влияет на заселенность энергетич. уровней. При обычно наблюдаемых интенсивностях света количество

поглощаемых фотонов намного меньше числа поглощающих атомов, поэтому  $\Delta N_{nm}$  не зависит от интенсивности света. Соответственно, не зависит от неё и  $k_1$ . Однако, если интенсивность падающего на среду света достаточно велика, то в возбужденном состоянии может перейти значит. доля поглощающих атомов. Это приведет к тому, что и  $\Delta N_{nm}$  и  $k_1$  будут зависеть от интенсивности света — возникнет т. н. нелинейное поглощение. В этом случае закон Бугера перестаёт быть справедливым. В пределе, при очень высокой интенсивности падающего света, населенности верх. и ниж. уровней выравниваются и среда перестаёт поглощать свет — просветляется, т. е. свет проходит через такую среду, вообще не считывая поглощения (см. *Самодуцированная прозрачность*).

При очень высокой интенсивности света возможна и ещё одна особенность П. с. — *многофотонное поглощение*, когда в одном акте одновременно поглощается несколько ( $i$ ) фотонов меньших частот при условии  $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_i = \omega_{nm}$ .

П. с. используется в разл. областях науки и техники. Так, на нём основаны мн. особо высокочувствительные методы количеств. и качеств. хим. анализа, в частности *абсорбционный спектральный анализ, спектрофотометрия, колориметрия*. Вид спектра П. с. удаётся связать с хим. структурой вещества, по виду спектра поглощения можно исследовать характер движения электронов в металлах, выяснить зонную структуру полупроводников и мн. др.

Лит.: Ландсберг Г. С., *Оптика*, 5 изд., М., 1976; Соколов А. В., *Оптические свойства металлов*, М., 1961; Елькин И. В., М. А., Атомная и молекулярная спектроскопия, М., 1962; Горюнов Ф. А., *Теоретическая оптика*, М., 1966; Борн М., Вольф Э., *Основы оптики*, пер. с англ., 2 изд., М., 1973.

**ПОГЛОЩЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТ** — отношение *потери излучения, поглощённого данным телом, к потоку излучения, упавшему на это тело*. Если падающий поток имеет широкий спектр, указанное отношение характеризуется т. н. интегральный П. к.; если же диапазон частот падающего света узок, то говорят о *мономатрическом П. к.* — *поглощательной способности тела*. В соответствии с законом сохранения энергии для монокроматич. излучения сумма П. к., *отражения коэффициента и пропускания коэффициента* равна единице. В отличие от *поглощения показателя*, характеризующего свойства вещества, П. к. зависит от толщины слоя, сквозь к-рый проходит свет, т. е. от размеров тела, от темп-ры, от состояния отражающей поверхности. В спектроскопии иногда под термином «П. к.» понимают показатель поглощения.

**ПОГЛОЩЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЬ ( $k_1$ )** — величина, обратная расстоянию, на к-ром поток монокроматич. излучения длины волны  $\lambda$ , образующий параллельный пучок, ослабляется в результате поглощения в веществе в  $e$  (натуральный П. к.) или в 10 (десятичный П. к.) раз (ГОСТ 7601—78). П. к. измеряется в см<sup>-1</sup> или м<sup>-1</sup>. Зависимость П. к. от частоты излучения наа. спектром поглощения вещества. Наряду с величиной  $k_1$  применяются также величина  $k = k_1 \lambda/4\pi$  (см. *Бугера — Ламберта — Бера закон*).

**ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА** — поглощённая энергия излучения, рассчитанная на единицу массы облучённого вещества (см. *Доза излучения*).

**ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ** — область течения вязкой жидкости (газа) с малой по сравнению с продольными размерами поперечной толщиной, возникающая у поверхности обтекаемого твёрдого тела или у границы раздела двух потоков жидкости с разл. скоростями, теми-рами или хим. составом. Возникновение П. с. связано с явлением переноса в жидкости кол-ва движения, теплоты и массы, характеризующих коэф. вязкости, теплопроводности и диффузии. Образование и развитие П. с. можно проследить на примере динамического (скоростного) П. с. у поверхности

тела, обтекаемого потоком жидкости или газа (рис. 1). Вследствие вязкости жидкости она «прилипает» к поверхности тела, т. е. на стенке продольная составляющая скорости жидкости равна нулю (если поверхность тела непроницаемая, то здесь равна нулю и поперечная составляющая скорости). Разрыв продольной составляющей скорости в вязкой жидкости существовать

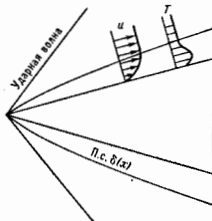


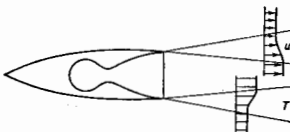
Рис. 1. Профили скорости и температуры в пограничном слое на поверхности острого конуса в сверхзвуковом потоке газа.

не может, поэтому возникает переходная область течения, т. е. П. с., в к-ром происходит плавное изменение скорости от нуля на стенке до нек-рого конечного значения во внеш. потоке, где влияние вязкости исчезает. Толщина такой переходной области и профиль скорости в ней определяются ур-ниями сохранения кол-ва движения. Помимо динамич. П. с. при обтекании тела можно выделить также тепловой (температурный) П. с., образующийся в случае несовпадения тем-ры поверхности тела и тем-ры жидкости, а также концентрационный (диффузионный) П. с., образующийся при протекании на стенке хим. реакции или же при вдуве инородного газа через проницаемую поверхность тела. В тепловом П. с. тем-ра жидкости непосредственно у стенки равна тем-ре поверхности тела. Если тело обтекается жидкостью с малой скоростью, то внутри теп-

лового П. с. происходит монотонное изменение тем-ры жидкости от тем-ры поверхности до тем-ры внеш. потока. Если же тело обтекается сверхзвуковым потоком газа, то внутри теплового П. с. вследствие торможения газа и перехода кинетич. энергии во внутр. энергию молекул может возникнуть максимум тем-ры.

Другой часто встречающийся на практике случай П. с.— это слой смешения, образующийся у границы струи, истекающей из сопла, напр. летат. аппарата с воздушно-реактивным или ракетным двигателем (рис. 2). В слое смешения скорость газа изменяется от скорости полёта до скорости истечения продуктов

Рис. 2. Слой смешения при истечении струи из сопла ракеты при полёте в атмосфере.



сгорания из сопла (в системе координат, связанной с летат. аппаратом), а тем-ра — от тем-ры атмосферы до тем-ры продуктов сгорания. Так же плавно изменяются концентрации компонент внеш. среды и продуктов сгорания.

Толщина динамич. П. с. определяется критерием Рейнольдса (см. Рейнольдса число  $Re$ ), к-рый характеризует соотношение между инерц. силами и силами внутр. трения. Чем больше  $Re$ , тем меньше толщина П. с. по сравнению с характерным размером тела. Обычно число  $Re$  намного превышает единицу, так что толщина П. с. б мала по сравнению с размерами тела. Кроме того, при этом оказывается несуществен-

ным изменение давления поперек П. с. В результате параметры жидкости или газа на внеш. границе П. с. могут быть определены так, как будто тело обтекается потоком идеальной (невязкой) жидкости. В более строгой постановке следует рассматривать обтекание идеальной жидкостью нек-рого эфф. тела, увеличенного на т. н. толщину вытеснения П. с. Это позволяет упростить методы расчёта трения и теплообмена между телом и обтекающей его жидкостью (газом). Для этого поток подразделяют на две части — область течения идеальной жидкости и тонкий П. с. у поверхности тела. Решая задачу об обтекании тела невязким потоком, находят распределение давления только поверхности тела, а тем самым и давление в П. с. Течение внутри П. с. рассчитывается после этого с учётом вязкости, теплопроводности и диффузии, что позволяет определить силы поверхностного трения и коэф. тепло- и массообмена.

Соотношение между толщинами динамич. и теплового П. с. определяется Прандтля числом  $Pr$ , а соотношение между толщинами динамич. и концентрац. П. с.— Шмидта числом  $Sc$ . Для воды, воздуха и мн. др. неподвижных жидкостей и газов числа  $Pr$  и  $Sc$  близки к 1, вследствие чего толщины динамич., теплового и концентрац. П. с. близки между собой.

Наличие вынужденного течения жидкости или газа не является обязательным для образования П. с. у поверхности тела. Примером является П. с., образующийся у поверхности погружённого в жидкость тела или у стенок сосуда с жидкостью в случае свободной конвекции, возникающей при наличии разности тем-ры жидкости и твёрдой стенки (рис. 3). В этом случае толщина П. с. определяется Грасгофа числом  $Gr$ .

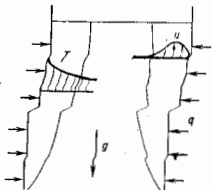


Рис. 3. Пограничный слой на стенках сосуда с жидкостью при повороте тела сбоку.

Характер течения жидкости внутри П. с. показывает, что при достаточно больших размерах тела (а точнее, при достаточно больших числах  $Re$  или  $Gr$ , рассчитываемых по длине тела) существуют два режима течения — ламинарное и турбулентное.

Ламинарный П. с. В нач. части П. с. течение является ламинарным, упорядоченным. Отд. частицы жидкости движутся по плавным траекториям, не пересекаясь и не перемешиваясь друг с другом. Форма этих траекторий близка к форме обтекаемого тела.

Дифференц. ур-ние течения вязкого теплопроводного однородного газа в ламинарном П. с. у поверхности тела произвольной формы могут быть получены из Навье — Стокса уравнений, отбрасыванием членов, к-рые несущественны при достаточно больших числах Рейнольдса, когда толщина П. с. мала по сравнению с размерами тела. Основы такого подхода были заложены Л. Прандтлем (L. Prandtl) в 1904. В случае стационарного двумерного течения эти упрощённые ур-ния Навье — Стокса, известные как ур-ния П. с., или ур-ния Прандтля, представляют собой нелинейные дифференц. ур-ния параболы. типа и имеют вид: ур-ние сохранения количества движения

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right); \quad (1)$$

ур-ние сохранения энергии

$$\rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + u \frac{dp}{dx} + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2; \quad (2)$$

ур-ние неразрывности

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $x$  и  $y$  — координаты, направленные вдоль поверхности тела и по нормали к ней,  $u$  и  $v$  — составляющие скорости вдоль этих координат,  $\rho$  — плотность,  $p$  — давление,  $\mu$  — коэф. динамич. вязкости,  $T$  — темп-ра,  $c_p$  — уд. теплоёмкость при пост. давлении,  $\lambda$  — коэф. теплопроводности.

Граничные условия к системе ур-ний (1) — (3) имеют вид:

при  $y = 0$  величины  $u = 0$ ,  $v = v_w$ ,  $T = T_w$ ;

при  $y \rightarrow \infty$   $u \rightarrow u_\infty$ ,  $T \rightarrow T_\infty$ .

В случае смеси газов, в к-рой могут протекать хим. реакции, к ур-ниям (1) — (3) добавляются ур-ния неразрывности для отд. компонент

$$\rho u \frac{\partial c_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (\rho c_i V_i) + w_i \quad (i=1, 2, \dots, N-1), \quad (4)$$

а ур-ние сохранения энергии удобнее записывать через энтальпию  $H$  газа

$$\rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + u \frac{dp}{dx} + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \sum_i \rho c_i V_i (H_i - h_i^0) \right], \quad (5)$$

где  $c_i$  — массовая концентрация  $i$ -й компоненты,  $V_i$  — скорость диффузии,  $w_i$  — массовая скорость образования  $i$ -й компоненты в единице объёма в результате хим. реакций,  $H_i$  — энтальпия  $i$ -й компоненты и  $h_i^0$  — теплота образования  $i$ -й компоненты при стандартных условиях. Скорость диффузии определяется градиентами концентраций отд. компонент (концентрац. диффузия), а также градиентом темп-ры (термодиффузия).

Для решения ур-ний П. с. используются разл. методы, среди к-рых можно выделить две осн. группы — численные (конечно-разностные) и интегральные. Первая группа методов основана на численном интегрировании исходных ур-ний П. с. методом сеток, или конечных разностей. Совр. ЭВМ позволяют это делать практически без внесения существенных упрощающих предположений, с учётом всех особенностей геометрии, физ.-хим. процессов и т. п. Широкое распространение в численных расчётах получал анализ ур-ний П. с. для разл. частных случаев, когда, вводя спец. переменные и опуская некоторые несущественные члены, с одной стороны, получают упрощение исходной системы ур-ний, а с другой — сами результаты получают в более обобщённом виде. К ним относятся разл. автоматические решения, для к-рых имеет место понижение размерности задачи (напр., случаи П. с. на плоской пластине и конусе, в окрестности критич. точки затупленного тела, на клиновидных телах в дозвуковом потоке). См. *Автоматические методы*.

Вторая группа методов основана на использовании ур-ний П. с. в интегральной форме. В этих ур-ниях в качестве зависимых переменных выступают некоторые интегральные характеристики П. с.: толщина и вы-

соки («1» относятся к внеш. потоку, «01» — к границе П. с., «0» — к П. с., а «0w» — к обтекаемой поверхности). Интегральные ур-ния П. с. получаются из дифференц. ур-ний типа (1) — (5) интегрированием последних по поперечной координате от 0 до внеш. границы П. с.

$$\frac{d}{dx} (\rho u_1^2 \delta^{**}) + \rho_1 u_1 \frac{du_1}{dx} \delta^* = \tau_w, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dx} [\rho_1 u_1 (H_{01} - H_w) \delta^{***}] = q_w, \quad (10)$$

где  $\tau_w$  — напряжение трения на поверхности тела, а  $q_w$  — тепловой поток через его поверхность. Интегральные ур-ния позволяют учесть изменяющиеся условия течения вверх по потоку от рассматриваемой точки тела.

Для решения интегральных ур-ний П. с. (9) — (10) необходимо иметь сведения о профиле скорости и эн-тальпии (или темп-ры) внутри П. с. В основе разл. приближённых методов решения ур-ний П. с. лежит использование нек-рых наборов профилей скоростей и темп-ры внутри П. с., напр. степенные профили. Знание профилей скорости и темп-ры позволяет связать между собой разл. характерные толщины П. с., входящие в ур-ния (9) — (10).

**Турбулентный П. с.** По мере увеличения расстояния вдоль поверхности тела местное число Рейнольдса возрастает и начинает проявляться неустойчивость ламинарного течения по отношению к малым возмущениям. Такими возмущениями могут служить пульсации скорости во внеш. набегающем потоке, шероховатость поверхности и др. факторы. В результате ламинарная форма течения переходит в турбулентную, при этом на главное «среднее» движение жидкости или газа в продольном направлении накладываются хаотич., пульсационные движения отд. жидких конгломератов в поперечном направлении. В результате происходит интенсивное перемешивание жидкости, вследствие чего интенсивность переноса в поперечном направлении кол-ва движения, теплоты и массы резко увеличивается. Потери устойчивости и переход к турбулентному режиму течения внутри П. с. происходит при нек-ром характерном числе Рейнольдса, к-рое наз. критическим. Величина  $Re_{кр}$  зависит от мн. факторов — степени турбулентности набегающего потока, шероховатости поверхности *Маха числа*  $M$  внеш. потока, относит. темп-ры поверхности, удва или отсоса вещества через поверхность тела и др. Поскольку переход ламинарного режима течения в турбулентный связан с потерей устойчивости, то сам этот процесс не является достаточно стабильным, вследствие чего имеет место «неремесимость» режима течения в пределах нек-рой области, к-рую называем областью перехода.

Изменение режима течения в П. с. сопровождается утолщением слоя и деформацией профилей скорости, темп-ры и концентраций. Одновременно возрастает коэф. поверхностного трения, тепло- и массообмена, а также изменяется характер их распределения вдоль поверхности тела (рис. 4).

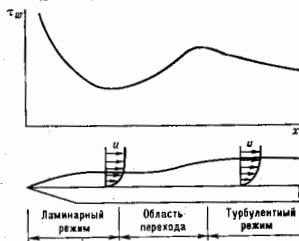


Рис. 4. Изменение режима течения в пограничном слое и поверхностного трения на плоской пластине.

$$\delta^* = \int_0^\delta \left( 1 - \frac{\rho u}{\rho_1 u_1} \right) dy, \quad (6)$$

толщина потери импульса

$$\delta^{**} = \int_0^\delta \frac{\rho u}{\rho_1 u_1} \left( 1 - \frac{u}{u_1} \right) dy, \quad (7)$$

толщина потери энергии

$$\delta^{***} = \int_0^\delta \frac{\rho u}{\rho_1 u_1} \left( \frac{H_{01} - H_0}{H_{01} - H_w} \right) dy \quad (8)$$

Течение внутри турбулентного П. с. носит пульсационный, хаотич. характер: давление, плотность, скорость, темп-ра, концентрация и др. характеристики поля течения быстро изменяются, пульсируют, и притом хаотически. В этом случае при матем. описании течения каждый параметр можно представить в виде суммы осредненного по времени, или среднего, значения и пульсационного. Напр.,  $u = \bar{u} + u'$ ,  $T = \bar{T} + T'$ . Интеграл по времени от пульс. составляющей любого параметра за достаточно большой интервал времени  $\Delta t$  (строго говоря, при  $\Delta t \rightarrow \infty$ ) равен нулю

$$\frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} u' dt = \bar{u}' = 0, \quad \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} T' dt = \bar{T}' = 0.$$

Однако осредненные значения произведений пульс. составляющих разл. параметров могут и не обращаться в нуль, что свидетельствует о корреляции между пульсациями. Именно корреляция между пульсациями разл. параметров объясняет нек-рым дополнит. механизм передачи кол-ва движения, энергии и диффузии в поперечном направлении.

Дифференц. ур-ния турбулентного П. с. имеют тот же вид, что и ур-ния ламинарного П. с. (1) — (5), с той лишь поправкой, что входящие в эти ур-ния коэф. вязкости, теплопроводности и диффузии представляются в виде суммы молекулярной и турбулентной составляющих. Вследствие наличия в этих ур-ниях турбулентных коэф. переноса вся система ур-ний турбулентного П. с. оказывается незамкнутой. Поэтому для получения приближенных решений ур-ний турбулентного П. с. привлекают дополнит. гипотезы и допущения. В частности, весьма плодотворной оказалась предложенная Л. Прандтлем гипотеза «пути перемешивания»  $l$ , позволяющая выразить коэф. турбулентной вязкости  $\mu_T$  через ср. плотность и градиент ср. скорости

$$\mu_T = \bar{\rho} l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|. \quad (11)$$

С помощью аналогичных выражений могут быть представлены также коэф. турбулентной теплопроводности и коэф. турбулентной диффузии.

В общем случае турбулентный П. с. можно по высоте разделить на 3 области (рис. 5): пристеночный ламинарный подслой, где турбулентные пульсации затухают

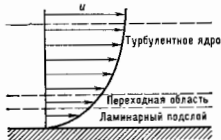


Рис. 5. Внутреннее строение турбулентного пограничного слоя.

и решающую роль играют молекулярные вязкость и теплопроводность; турбулентное ядро, в котором турбулентные вязкость и теплопроводность существенно превышают соответствующие молекулярные переносные свойства, и промежуточную переходную область. В результате многочисленных эксперим. исследований установлено, что распределение скорости внутри турбулентного ядра описывается нек-рым универсальным эмпирич. законом

$$\frac{u}{u_*} = 5,6 \lg \frac{y u_*}{\nu} + 4,9,$$

где  $u_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$  — г. п. скорость сдвига, или динамич. скорость, а  $\nu = \mu / \rho$  — кинематич. вязкость. Следует отметить, что логарифм. закон распределения скорости внутри турбулентного ядра П. с. может быть получен исходя из ф-лы Прандтля для турбулентной вязкости (11) в предположении, что входящий в эту ф-лу

пути перемешивания  $l$  пропорц. расстоянию от стенки. При использовании приближенных методов расчета турбулентного П. с. широко используются также степенные профили скорости и темп-ры

$$\frac{u}{u_*} = \left( \frac{y}{\delta} \right)^{1/n}, \quad \frac{T_w - T_w}{T_w - T_w} = \left( \frac{y}{\delta_T} \right)^{1/n_1},$$

где  $T_0$ ,  $T_{01}$  и  $T_w$  — соответствующие темп-ры торможения в П. с., на границе П. с. и в стенке. Значения показателей степени для дозвуковых скоростей изменяются от  $1/7$  до  $1/8$  при увеличении числа Рейнольдса и несущественно возрастают при больших числах Маха.

В прикладных расчетах трения, тепло- и массообмена в турбулентном П. с. наиб. распространение получили полуэмпирич. методы, в частности метод, основанный на экстрем. данных по турбулентному трению на плоской пластине (аналогия процессов тепло-массообмена и трения и введение понятия «эффективной длины»). Эксперим. данные по турбулентному коэф. трения на плоской пластине, обтекаемой сверхзвуковым потоком, могут быть представлены аппроксимационной ф-лой

$$c_{fT_w} = 0,059 \text{Re}_w^{0,8} \left( \frac{T_w}{T_e} \right)^{0,4} \left( 1 + r \frac{k-1}{2} M_1^2 \right)^{0,11},$$

где  $c_{fT_w} = 2\tau_w / \rho_w u_*^2$  — коэф. поверхностного трения,  $\text{Re}_w = \rho_w u_* x / \mu_w$  — число Рейнольдса,  $T_e = T_1 (1 + r(k-1)M^2/2)$  — равновесная темп-ра стенки,  $r$  — коэф. восстановления темп-ры,  $M_1$  — число Маха внеш. потока,  $k = c_p / c_v$  — отношение теплоемкостей при пост. давлении и пост. объеме.

Предположение об аналогии процессов тепло-массообмена и трения, следующее из самого вида ур-ний П. с., позволяет для безразмерного коэф. теплообмена на пластине — Нуссельта числа  $Nu$  — записать ф-лу, к-рая хорошо согласуется с имеющимися экстрем. данными:

$$Nu_w = \frac{\alpha x}{\lambda_w} = 0,0296 \text{Re}_w^{0,8} \text{Pr}_w^{0,43} \left( \frac{T_w}{T_e} \right)^{0,4} \left( 1 + r \frac{k-1}{2} M_1^2 \right)^{0,11}$$

( $\alpha$  — коэф. теплоотдачи,  $\lambda_w$  — коэф. теплопроводности газа на стенке). Для переноса этой зависимости на случай П. с. на теле произвольной формы может быть использован предложенный В. С. Андрусовским метод «эффективной длины», предполагающий, что тепловой поток в рассматриваемой точке тела будет таким же, как в нек-рой точке на пластине при одинаковых местных параметрах течения и при условии, что в рассматриваемых точках тела и пластины толщины потери энергии  $\delta^{***}$  (8) также одинаковы. Т. о., задача теплообмена сводится к определению эфф. длины пластины, для к-рой достигается необходимое значение толщины потери энергии. Если темп-ра стенки постоянна, то, напр., для осесимметричного тела при произвольном распределении давления вдоль поверхности эфф. длина  $x_{эф}$  равна

$$x_{эф} = \frac{1}{r^2 \rho_w u_*} \int_0^x R^2 \rho_w u_* dx,$$

где  $R$  — переменный радиус поперечного сечения тела, а  $u_*$  — скорость жидкости или газа на внеш. границе П. с.

Течение в П. с. оказывает решающее влияние на явление отрыва потока от поверхности обтекаемого тела как во внешних (напр., обтекание крыла), так и во внутренних (напр., течение в диффузоре) течениях. Отрыв происходит в результате совместного действия двух осн. факторов — торможения жидкости в П. с. и воздействия перепада давления. Внутри П. с. скорость жидкости или газа уменьшается и её кинетич. энергия оказывается недостаточной для преодоления возрастающего давления. В результате вблизи поверхности возникает область возвратного течения, П. с. утолщается

и, наконец, осн. поток отрывается от стенки (рис. 6) (см. *Отрывное течение*).

Способность течения в П. с. противостоять повышению давления имеет важное значение в случае падения на тело ударных волн, или скачков уплотнения. Существует критич. значение отношения давлений в скачке

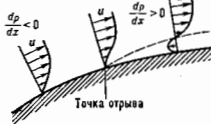


Рис. 6. Отрыв пограничного слоя при наличии положительного градиента давления.

$p_2/p_1$  (т. н. критич. перепад, где  $p_2$  — давление за, а  $p_1$  — перед скачком уплотнения), при к-ром взаимодействие скачка уплотнения с П. с. приводит к отрыву последнего. Величина критич. перепада давления  $(p_2/p_1)_{кр}$  зависит от режима течения в П. с., числа Маха, а для ламинарного П. с. и от числа Рейнольдса. При воздействии достаточно сильного скачка уплотнения на тело П. с. отрывается и возникает конфигурация т. в. А-скачка, у к-рого наклон передней «ножки» формируется таким образом, чтобы перепад давления на ней был равен критическому (рис. 7).

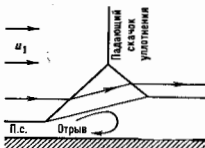


Рис. 7. Картина течения при взаимодействии пограничного слоя с действующим на тело скачком уплотнения.

Лит.: Лойцицкий Л. Г., Механика жидкости и газа, 6 изд., М., 1987; его же, Ламинарный пограничный слой, М., 1962; Шлихтин и Г. Т. Теория пограничного слоя, пер. с нем., М., 1974; Основы теплотехники в авиационной и ракетно-космической технике, М., 1975. Н. А. Андрико.

**ПОДВИЖНОСТЬ** электронов и ионов в газе и в низкотемпературной плазме — коэф. пропорциональности  $\mu$  в соотношении  $v_{др} = \mu E$ , связывающем величину скорости дрейфа  $v_{др}$  электронов (ионов) в газе с величиной напряженности электрич. поля  $E$ , вызывающего этот дрейф. Понятие П. электронов и ионов имеет физ. смысл при условии, когда характерная длина пробега рассматриваемой заряд. частицы много меньше характерного размера системы в направлении движения частицы. П. электронов и ионов выражается через электронную (ионную) проводимость плазмы  $\sigma_{e,i}$  соотношением

$$\mu_{e,i} = \sigma_{e,i} / e N_{e,i}$$

где  $N_{e,i}$  — плотность электронов (ионов),  $e$  — заряд электрона. Теоретически П. электронов и ионов впервые анализировал П. Ланжевэн (P. Langevin) в 1903, первым измерил  $\mu_e$  Дж. Таунсенд (J. S. Townsend), изучая диффузию пучка электронов, движущихся в электрич. поле, и смещение этого пучка в магн. поле.

Согласно элементарной кинетич. теории, величина П. электронов и ионов выражается через характерную частоту упругих соударений  $\nu_{e,i}$  заряд. частицы с частицами газа:

$$\mu_{e,i} = e / m \nu_{e,i} \quad (1)$$

( $m$  — приведенная масса заряд. частицы и частицы газа). Как следует из соотношения (1), величина П. электронов и ионов обратно пропорц. плотности нейтральных частиц  $N$ . Истинное значение П. отличается от результата оценки (1) вследствие сложного характера зависимости сечения упругого рассеяния  $\sigma_{уп}$  от скорости соударения  $v_T$ . Решение кинетич. ур-ния Больцма-

на с учётом этой зависимости приводит к численному отличию истинного и приближенного значения  $\mu$  не более чем на неск. десятков процентов.

П. электронов и ионов связана с их коэф. диффузии  $D$  в газе соотношением Эйнштейна

$$eD/\mu = (2/3)\mathcal{E}_e, \quad (2)$$

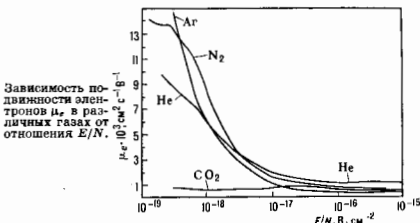
где  $\mathcal{E}_e$  — характеристич. энергия электронов (ионов), значение к-рой близко к их ср. энергии и в точности совпадает с последней при слабых полях, когда имеет место максвелловское распределение заряд. частиц по энергиям ( $\mathcal{E}_e = (3/2)kT$ ). П. ионов  $\mu_i$  и электронов  $\mu_e$  обычно исследуют раздельно, т. к. различны элементарные процессы, определяющие движение тех и др. частиц.

П. электронов. Осн. отличит. особенность П. электронов проявляется в зависимости  $\mu_e$  от отношения напряженности электрич. поля  $E$  к плотности газа  $N$ . Причина такой зависимости заключается в том, что из-за малой массы электроны при упругих столкновениях с тяжелыми частицами теряют лишь незначит. часть энергии. Поэтому даже в слабых полях ср. энергия электронов в газе практически всегда превышает ср. энергию тяжелых частиц и пропорц. величине энергии  $eEL = eEN\lambda$ , забравшейся электроном за время между двумя столкновениями ( $\lambda$  — длина свободного пробега электрона в газе). Вследствие зависимости  $\sigma(E)$  это приводит к зависимости П. электронов от отношения  $E/N$  (рис.). Характер такой зависимости определяется сортом газа. В табл. 1 приведены значения П. электронов в разл. газах при нормальных условиях.

Табл. 1. — Подвижность электронов  $\mu_e$  (см<sup>2</sup>/с·В) в газах при различных отношениях  $E/N$ .

Газ	$E/N \cdot 10^{-11}, \text{В} \cdot \text{см}^3$			
	0,03	1,0	10	100
He	8700	1900	930	1030
Ne	16000	2150	1400	960
Ar	14800	1100	410	270
Kr	12000	740	—	—
Xe	1480	520	—	240
H <sub>2</sub>	5700	2300	700	470
N <sub>2</sub>	13600	1600	670	370
O <sub>2</sub>	32000	3700	1150	590
CO	—	3700	970	390
NO	—	4400	1700	—
CO <sub>2</sub>	670	670	780	480
CH <sub>4</sub>	—	—	310	260
CF <sub>4</sub>	—	—	—	42

Экспериментально П. электронов определяют при измерении зависимости дрейфовой скорости электронов от приведенной напряженности электрического поля  $E/N$ . Величину дрейфовой скорости находят либо на основании измерений проводимости плазмы и кон-



Зависимость подвижности электронов  $\mu_e$  в различных газах от отношения  $E/N$ .

центрации заряд. частиц, либо в результате измерений времени прохождения электронным роem определенного расстояния. Результаты измерений П. электронов служат одним из осн. источников определения энергетич.

зависимости сечения упругого рассеяния электронов на атоме или молекуле.

**П. ионов**, в отличие от П. электронов, в широком диапазоне изменения напряжённости электрич. поля  $E$  практически от него не зависит. П. ионов в состоянии в газе определяется резонансной *перезарядкой иона* на атоме. При столкновении с нейтральной частицей ион обменивается с ней зарядом, а возникший ион начинает движение, перенос заряда имеет эстафетный характер (*Сена эффект*). П. ионов в собств. газе надлежит рассчитывать на основе асимптотич. теории резонансной перезарядки ионов. С учётом зависимости сечения резонансной перезарядки  $\sigma_{рез}$  от скорости соударений ионов П. ионов определяется формулой

$$\mu_i = \frac{1300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}}{N \sqrt{m_i T} \sigma_{рез}(2, 13v_T)}, \quad (3)$$

где  $m_i$  — масса иона, выраженная в единицах протонных масс,  $v_T = \sqrt{2T/m_i}$  — ср. относ. скорость соударения,  $T$  — темп-ра. Поправки к выражению (3), учитывающие упругое рассеяние иона на атоме и ионизацион. захват, при комнатной и более высокой темп-рах обычно не превышают 10–15%. В табл. 2 представлены значения П. ионов инертных газов и щелочных металлов в собств. газе, приведённые к атм. давлению.

Табл. 2.—Подвижность  $\mu$  ионов инертных газов и щелочных металлов

Т, К	Газ				
	He	Ne	Ar	Kr	Xe
77	45,3	5,8	2,1	—	—
195	11,7	4,8	1,8	—	—
300	10,2	4,2	1,6	1,0	0,66
Т, К	Металлы				
	Na	K	Pb	Cs	
500	0,37	0,23	0,14	0,10	
1000	0,29	0,18	0,11	0,077	

Осн. вклад в П. иона в чужом газе вносит упругое рассеяние иона на нейтральной частице (атоме, молекуле), характер к-рого определяется поляризац. взаимодействием заряда иона с наведённым диполем нейтральной частицы. При этом величина  $\mu_i$  выражается через поляризуемость нейтральной частицы  $\alpha$  соотношением

$$\mu_i = \frac{7,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^2}{N \sqrt{am}} \left( \frac{\text{см}^2}{\text{с} \cdot \text{В}} \right), \quad (4)$$

где  $m$  — приведённая масса иона и нейтральной частицы, выраженная в единицах протонных масс,  $\alpha$  — поляризуемость нейтральной частицы в атомных единицах. Как следует из (4), П. ионов в чужом газе не зависит от  $T$ , что обусловлено обратной пропорц. зависимостью сечения упругого рассеяния при поляризац. взаимодействии  $\sigma_{ур} \sim v_T^{-2}$ . Поправки к (4), учитывающие вклад обменног. взаимодействия иона с нейтральной частицей, обычно не превышают 10–20%.

**П. ионов в растворах**  $U = Fu$ , где  $F$  — *Фарадея постоянная*, и — скорость иона в см/с при напряжённости электрич. поля 1 В/см. Величина  $U$  зависит от природы иона, темп-ры, диэлектрич. проницаемости и концентрации раствора.

Лит.: Смирнов Б. М., Ионы и возбуждённые атомы в плазме, М., 1974; Елецкая Я. А. В., Палкина Л. А., Свиридов Б. М., Явления переноса в слабоионизированной плазме, М., 1975; Мак-Дональд И., Мэзон Э., Подвижность и диффузия ионов в газах, пер. с англ., М., 1976; Хаскли Л., Кромптон Р., Диффузия и дрейф электронов в газах, пер. с англ., М., 1977. А. В. Елецкий.

**ПОДВИЖНОСТЬ ПОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА** в электронных проводниках — отношение скорости направленного движения носителей заряда — *электронов проводимости* и дырок (*дрейфовый* скорости  $v_{др}$ ), вызванного электрич. полем, к напряжённости  $E$  этого поля:

$$\mu = v_{др}/E.$$

Дрейфовая скорость и, следовательно, П. н. з. ограничиваются процессами их рассеяния, к-рые происходят на дефектах кристаллич. решётки (гл. обр. на примесных атомах), а также на тепловых колебаниях кристаллической решётки (испускания или поглощения фонон, электрон изменяет свой квазиимпульс, а следовательно и скорость  $v_{др}$ ). Поэтому П. н. з. зависит от темп-ры  $T$ . С понижением  $T$  доминирующим становится рассеяние на заряд. дефектах, вероятность к-рого растёт с уменьшением энергии носителей.

Ср. дрейфовая скорость  $\bar{v}_{др} = eEt/m$ , где  $m$  — *эффективная* масса носителей,  $e$  — их заряд,  $t$  — время релаксации и мюльса (транспортное время). Отсюда:

$$\mu = et/m.$$

Подвижность кристалла  $\sigma$  связана с П. н. з. соотношением

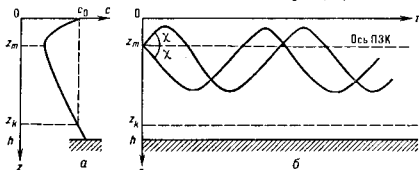
$$\sigma = ne\mu,$$

где  $n$  — концентрация носителей. Понятие П. н. з. играет важную роль при описании свойств *полупроводников* или др. проводников, в к-рых  $\mu$  зависит от  $T$ , т. к. позволяет разделить вклады в температурной зависимости  $\sigma(T)$ , возникающие из изменения  $n$  с темп-рой, и температурной зависимости вероятности *рассеяния носителей заряда*.

П. н. з. при  $T = 300 \text{ К}$  варьируется в пределах от  $10^5$  до  $10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . В слабом электрич. поле подвижность  $\mu > 0$  как для электронов, так и для дырок, хотя направления их дрейфа противоположны. У разных типов носителей в одном и том же веществе и различны, а в аннотронных кристаллах и зависит от направления поля  $E$  относительно кристаллографич. осей. В сильных электрич. полях ср. энергия электронов  $\bar{\epsilon}$  превышает равновесную и растёт с ростом поля  $E$ . При этом  $\mu$  и, следовательно,  $\sigma$  также начинают зависеть от поля  $E$  (см. *Горькие электроны*).

Лит.: Блатт Ф., Дж., Теория подвижности электронов в твёрдых телах, пер. с англ., М., Л., 1963; Гаттасер В., Ф., Левинсон И. Б., Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках, М., 1984.

**ПОДВОДНЫЙ ЗВУКОВОЙ КАНАЛ** — природный *волновод акустический*, к-рый образуется в океане вследствие особого вида зависимости скорости звука от глубины. Скорость звука на нек-рой глубине, наз. осью П. з. к., достигает мин. значения. При отходе от оси вверх скорость звука растёт в основном из-за повышения темп-ры воды, при отходе вниз увеличивается из-за роста гидростатич. давления (линее ось П. з. к. темп-ра близка к постоянной; рис., а). Осн. ха-



Подводный звуковой канал: а — типичная зависимость скорости звука от глубины; б — глубина оси канала,  $h$  — глубина оксана,  $z_m$  — глубина, на к-рой скорость звука равна скорости звука у поверхности; б — лучевая картина распространения звука, когда источник звука расположен на глубине  $z_m$ .

характеристиками П. з. к. являются глубина оси, ширина канала и величина перепада скорости звука у поверхности и на оси. Глубина оси П. з. к. в средних широтах составляет 1000–1200 м, в тропич. зонах опускается до 2000 м, а в арктич. и антарктич. районах выходит на поверхность (приповерхностный звуковой канал).

Если источник звука расположен на оси П. з. к. или вблизи неё, то звуковые лучи, выходящие под небольшими углами к оси, вследствие рефракции звука будут вновь и вновь возвращаться к ней, т. е. будут «захвачены» П. з. к. (т. н. волноводное распространение; рис., б). Чем больше разность значений скорости звука на поверхности и на оси П. з. к., тем в более широком интервале углов  $\chi$  захватываются лучи, т. е. тем более эффективным будет П. з. к. При распространении в нём звуковые волны не касаются их поверхности, и дно океана и, следовательно, не рассеиваются и не поглощаются на его границах. Благодаря этому звук НЧ, для к-рых поглощение в морской воде весьма мало, может распространяться в П. з. к. на сотни и тысячи км («сверхдальнее» распространение). В одном из экспериментов звук от небольших подводных взрывов регистрировался на расстоянии 19000 км. Способность звука распространяться по П. з. к. на большие расстояния имеет многозначленные практ. приложения. П. з. к. в океане был открыт в сер. 40-х гг. 20 в.

Лит.: Акустика океана, под ред. Л. М. Бреховских, М., 1974; Бреховских Л. М., Лисенко А. Ю., П. Акустика океана, в кн. Физика океана, т. 2, М., 1978, ст. 2; и др. же, Теоретические основы акустики океана, ДЛ, 1982.

Ю. П. Лисенко

**ПОДОБИЯ ЗАКОНЫ** — свойственны таким физ. процессам, в к-рых характерные физ. величины, будучи функциями др. величин (аргументов), зависят от них не по отдельности, а от определённых комбинаций аргументов (напр., произведения, отношения и др.). Соответствующие П. з. кривые, отображая зависимость физ. величины от одного из аргументов, при изменении другого сохраняют свою форму, оставаясь подобными (см. Подобия теория).

П. з. в газовом разряде проявляются во мн. закономерностях поведения электронов в слабоионизов. газе. Напр., скорость дрейфа электронов  $v_d$  в пост. электрич. поле напряжённостью  $E$  зависит от  $E$  и от плотности молекул  $N$  не порознь, а от их комбинации  $E/N$ . Часто слабоионизов. газ мало нагревается током, и его абс. темп-ра более или менее постоянна и близка к  $T \approx 300$  К [темп-ра электронного газа существенно выше,  $T_e \approx (1-3) \cdot 10^4$  К]. При пост. темп-ре плотность  $N$  однозначно определяется давлением  $p = NkT$ , обычно используемым в физике газового разряда в качестве меры плотности. При темп-ре  $20^\circ\text{C}$   $p = 1$  торр (1 мм рт. ст.) соответствует  $N = 3,3 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ .

П. з. имеют большое практ. значение. Напр., для нахождения скорости дрейфа в определённом газе при двух условиях  $E = 10$  В/см,  $p = 10$  торр и  $E = 20$  В/см,  $p = 20$  торр достаточно одного измерения. В обоих случаях отношение  $E/p$ , а следовательно, и  $v_d$  одинаковы. Результаты измерений ф-ции двух переменных  $v_d(E, p)$  представляются не в виде семейства кривых, а в виде одной кривой  $v_d(E/p)$ . Зависимость  $v_d(E/p)$  наглядно следует из ф-лы элементарной теории  $v_d = eE/mv_m$ , где  $v_m$  — частота столкновений электрона с молекулами, пропорциональная  $N$ . Закономерность  $v_d(E/p)$  сохраняется и в строгой теории, основанной на решении кинетич. ур-ния для ф-ции распределения электронов. Энергетич. спектр, от к-рого зависит  $v_d$ , как и ср. энергия электронов, является ф-цией  $E/N$  или  $E/p$ .

Частота ионизации  $\nu_i$  в пост. поле  $E$ , т. е. число актов ионизации, к-рое совершает электрон в 1 с, подчиняется П. з.  $\nu_i = pf(E/p)$ , где  $f$  — нек-рая ф-ция, определяемая спектром электронов. В пост. поле электронов в среднем движется вдоль поля, и целесообразнее

пользоваться ионизац. коэф. Таунсенда  $\alpha$  — числом актов ионизации, к-рое электрон совершает на 1 см дрейфового пути:  $\alpha = \nu_i/v_d = pf_1(E/p)$ . Коэффициент  $\alpha$  определяет напряжение пробоя  $V_p$  промежутка  $d$  между плоскими электродами ( $V_p$  наз. также потенциалом зажигания разряда). Величина  $V_p$  для данного газа зависит от  $d$  и  $p$ . При этом справедливо П. з.  $V_p = V_p(p/d)$ . Такие зависимости, найденные из опыта (рис. 1), наз. кривыми Пашена. Пашена закон подобия

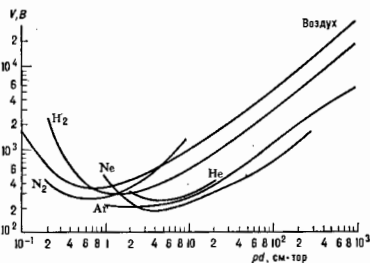


Рис. 1. Зависимости потенциалов зажигания от  $\bar{p}$  (кривые Пашена) для различных газов.

вытекает из ур-ния Таунсенда  $\gamma(e^{d\alpha} - 1)$ ,  $V_p = Ed$ , выражающего условие воспроизводства разряжающихся электронов в промежутке с учётом вытягивания зарядов из газового объёма на электроды и эмиссии электронов с катода под действием полей. Один ион при нейтрализации электроном катода вызывает дополнительно  $\gamma \sim 10^{-1} - 10^{-3}$  электронов. С помощью эмпирической формулы Таунсенда  $\alpha = A \exp(-Bp/E)$ , где  $A$  и  $B$  — эксперим. константы, различные для каждого газа, для кривых Пашена получается явная ф-ла  $V_p = B(p/d)(C + \ln p/d)$ , где  $C = \ln [A/\ln(\gamma + 1)]$ . Напр., для азота в диапазоне  $E/p = 100 \div 600$  В/см·торр,  $A = 12$  см $^{-1}$ ·торр $^{-1}$ ,  $B = 342$  В/(см·торр).

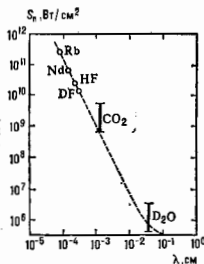
Плотность тока на катоде в нормальном тлеющем разряде  $i_n$ , толщина катодного слоя  $d_n$  и катодное падение потенциала  $V_n$  подчиняются П. з.  $i_n/p_n = \text{const}$ ,  $p_n d_n = \text{const}$ ,  $V_n = \text{const}$ , где константы зависят только от рода газа и материала катода. Для продольного поля  $E$  в положении столбе тлеющего разряда низкого давления в трубке радиуса  $R$  справедливо Д. з.  $E/p = f_2(p/R)$ . Он вытекает из равенства  $v_i = vd$ , выражающего баланс числа зарядов в столбе. Здесь  $vd = D_a(2a/R)^2 \sim 1/pR^2$  — ср. частота диффузионных уходов зарядов к стенкам трубки, где заряды взаимно нейтрализуются;  $D_a$  — коэф. амбиполярной диффузии.

В электрич. полях очень больших частот  $\omega$ , превышающих частоту столкновений электронов с атомами  $\nu_m$ , действует П. з. по частоте поля: частота ионизации газа электронами зависит от отношения  $E/\omega$ :  $\nu_i = pf_1(E/\omega)$ , где  $E$  — среднеквадратичная величина осциллирующего поля. При данном давлении газа частота ионизации остаётся неизменной, если с переходом к более высоким частотам пропорц. частоте увеличивается поле. Такая зависимость следует из выражения для скорости приобретения энергии электроном от переменного поля  $(d\epsilon/dt)_E = e^2 E^2 \nu_m / m \omega^2 \sim (E/\omega)^2 p$ .

Для порогового поля пробоя газа короткими импульсами больших частот  $\omega \gg \nu_m$  справедлив закон подобия  $E_p/\omega = \text{const}$ , выполняющийся в широком диапазоне частот для длин волн  $\lambda = 2\pi c/\omega$ , от видимого света до СВЧ-излучения. Для пробоя газа ИК-излучением требуются существенно более высокие поля, чем в случае СВЧ. На рис. 2 показаны (в логарифмич. 667



Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения, необходимой для пробоя, от длины волны  $\lambda$ .



масштабе) измеренные интенсивности излучения  $S_p = cE^2/4\lambda$ , необходимые для пробоя атм. воздуха импульсными разл. лазеров. Пунктир соответствует теоретич. зависимости  $S_p \sim \lambda^{-2}$ , отклонение пунктирной линии от логарифмич. прямой в области СВЧ-волн закономернo и связано с нарушением упомянутого выше условия  $\omega \gg \nu_{\text{атм}}$ . П. з. по частоте также находит строгое обоснование в кинетич. ур-нии для электронов в осциллирующем поле.

Литм. Райзер Ю. П., Физика газового разряда, М., 1987. Ю. П. Райзер.

**ПОДОБИЯ КРИТЕРИИ** — безразмерные числа, составленные из размерных физ. величин, определяющих рассматриваемое физ. явление. Любая физ. величина представляет собой произведение численного значения (чистого числа) на единицу измерения и, т. о., всегда зависит от выбора системы единиц измерения. Значения П. к. от единиц измерения не зависят. Равенство всех одностовных П. к. для двух физ. явлений (процессов) или систем — необходимое и достаточное условие физ. подобия этих систем (см. *Подобия теория*). П. к., представляющие собой отношения одноименных физ. параметров систем, находящихся в одинаковых условиях, наз. тривиальными и при установлении определяющих П. к. обычно не рассматриваются: равенство их для двух систем определяет физ. подобие. Нетривиальные безразмерные комбинации, составленные из определяющих параметров, и являются П. к. Всякая новая комбинация из П. к. также есть П. к., что даёт возможность в каждом конкретном случае выбрать наиб. удобные и характерные критерии. Число определяющих нетривиальных П. к. меньше числа определяющих физ. параметров с разл. размерностями на величину, равную числу определяющих параметров с независимыми размерностями (см. *Размерностей анализ*).

Матем. модели законов природы, из к-рых получаются ур-ния, описывающие любое физ. явление, не зависят от выбора системы мер. Поэтому ур-ния, описывающие физ. явления, можно привести к безразмерному виду путём введения нек-рых характерных значений для каждого из определяющих физ. параметров. Тогда безразмерные коэф. новой безразмерной системы ур-ний, составленные из определяющих физ. параметров, и будут П. к. рассматриваемого явления (процесса). Величины П. к. зависят от выбора характерных значений определяющих параметров.

Так, в ур-нии 2-го закона Ньютона  $F = m\ddot{x}$  определяющими движением тела физ. параметрами являются действующая на движущееся тело сила  $F$ , масса тела  $m$ , длина пути  $l$  и время  $t$  ( $\omega = d^2l/dt^2$  — ускорение тела). Обозначив чертой сверху безразмерные переменные, отсвёсённые к нек-рым характерным значениям  $F$ ,  $m$ ,  $l$ ,  $t$ , получим безразмерное ур-ние  $(F^*/m)F = \ddot{m}(d^2l/dt^2)$ . Коэф.  $F^*/m$  —  $Ne$  в левой части ур-ния является П. к. механич. движения и наз. ч и с л о м Н ь ю т о н а .

Когда ур-ния, описывающие физ. явление, неизвестны, П. к. отыскиваются при помощи анализа размерностей определяющих физ. параметров. Напр., состояние движения вязкой жидкости в цилиндрич. трубе определяется четырьмя параметрами: плотностью  $\rho$ , скоростью  $v$ , вязкостью жидкости  $\eta$  и диаметром трубы  $d$ . Из четырёх параметров можно составить только одно безразмерное число — *Рейнольдса число*  $Re = \rho v d / \eta$ , к-рое и является П. к. рассматриваемого движения. Каждый из П. к. имеет свой физ. смысл, как величина, пропорц. отношению одностовных физ. величин. Из записи числа  $Re$  в виде  $Re = \rho v^2 \eta / (v^2 d)$  следует, что числитель пропорционален динамич. напору потока (силам инерции), а знаменатель — силам вязкого (молекулярного) трения.

П. к. используются при моделировании и установлении общих физ. закономерностей (критериальных зависимостей) в теории упругости, гидроаэромеханике, теплофизике, электротехнике и электродинамике, магн. гидродинамике и др. областях физики. При изучении упругих деформаций конструкции под воздействием внеш. сил осн. П. к. являются коэф. Пуассона для материала конструкции и  $|e_1/e_2|$  и критерий  $E/\rho g b$ ,  $F/E\lambda$ , где  $e = \Delta l/l$  — относц. продольная деформация,  $e_1 = \Delta d/d$  — относц. поперечная деформация,  $E$  — модуль Юнга (см. *Модули упругости*),  $\rho$  — плотность материала конструкции,  $F$  — характерная внеш. сила,  $b$  — характерный размер конструкции,  $g$  — ускорение свободного падения.

В процессах, изменяющихся с течением времени  $t$ , осн. П. к. характеризующим одинаковость протекания процессов во времени, является критерий гомохронности  $Ho = vt/l$ .

При изучении гидроаэромеханич. процессов, теплопередачи и массоперенач различают П. к. в виде безразмерных постоянных, характеризующих вещество (среду), и П. к., связанные с переносом импульса, теплоты или массы. П. к., характеризующие вещество: *Прандтля число*  $Pr = \nu/\alpha$ , *Шмидта число*  $Sc = \nu/D$ , *Льюиса число*  $Le = a/D$ , а также отношение уд. теплоёмкостей при пост. давлении и пост. объёме  $\gamma = c_p/c_v$ . Здесь  $\nu = \eta/\rho$  — коэф. кинематич. вязкости,  $\alpha = \lambda/\rho c_p$  — коэф. температуропроводности,  $\lambda$  — коэф. теплопроводности,  $D$  — коэф. диффузии.

П. к., связанные с переносом импульса: *Рейнольдса число*  $Re = v l/\nu$ , *Эйлера число*  $Eu = \Delta p/\rho v^2$ , *Фруда число*  $Fr = v^2/g l$ , число Вебера  $We = \rho v^2 l/\sigma$ , *Маха число*  $M = v/c$ , *Кнудсена число*  $Kn = \lambda/l$  и *Струцала число*  $Sh = U l/\nu$ , являющиеся критерием гомохронности в гидроаэромеханике. При изучении нек-рых процессов удобно пользоваться также *Архимеда числом*  $Ar = g R \Delta \rho / \rho^2$ , числом Галилея  $Ga = Re^2/Pr$ , числом кавитации  $ka = 2Eu$  и др. П. к. В приведённых выражениях  $\Delta p$ ,  $\Delta \rho$  — характерные разности давлений и плотностей,  $c$  — скорость звука,  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $\lambda$  — длина свободного пробега молекул,  $f$  — характерная частота.

П. к., связанные с переносом теплоты: температурный фактор  $T_w/T_0$ , *Нуссельта число*  $Nu = \alpha l/\lambda$ , *Стефана число*  $St = \alpha/\rho v c_p$ , *Грасшофа число*  $Gr = F g \beta \Delta T/\nu^2$ , *Пекле число*  $Pe = Re \cdot Pr$ , *Раяля число*  $Ra = Gr \cdot Pr$  и *Фурье число*  $Fo = at/\lambda^2$ , являющиеся критерием гомохронности тепловых процессов. (См. также *Био число*  $Bi = \alpha l/\lambda_w$ ). В этих выражениях  $T_w$ ,  $\lambda_w$  — темп-ра и коэф. теплопроводности стенки, обтекаемой жидкостью или газом,  $T_0$  — темп-ра торможения потока,  $\Delta T$  — характерная разность темп-р,  $\alpha$  — коэф. теплопередачи.

Аналогичные П. к. характеризуют перенос материи в бинарной смеси (массопереначу): число Нуссельта для массопереначи  $Nu^* = kl/\rho D$  (наз. также диффузионным числом Нуссельта  $Nu_D$ ), число Пекле для массопереначи  $Pe^* = v l/D = Re \cdot Sc = Pe \cdot Le$ , число Стентона  $St^* = kl\rho = Nu^*/Pe^*$ , число Грасшофа  $Gr^* = F g \beta^* \times \Delta z/\nu^2$  и число Фурье  $Fo^* = D t/F^2 = Fo/Le$ , являю-

щесся критерием гомотропности для массопередачи. Здесь  $k$  — коэф. массопередачи,  $\Delta z$  — характерная разность молярных долей вещества в смеси,  $\beta' = -\rho^{-1}(\partial\rho/\partial z)_{T,P}$ .

Основными П. к. в магн. гидродинамике являются магн. число Прандтля  $Pr_m = \nu_{\text{маг}}\sigma_0$ , магн. число Рейнольдса  $Re_m = \nu_{\text{маг}}\sigma_0 = Re \cdot Pr$ , Альвена число  $Al = \nu/\nu_A$ , Гартаман число  $Ha = B/(\sigma_0\rho\nu)^{1/2}$ , числа Каулинга  $Co_1 = Ha^2/Re$  и  $Co_0 = Al^2$  и критерий магнитодинамич. гомотропности  $Ho_m = \nu/\sigma_0\mu_0^{1/2}$ . В этих выражениях  $\mu_0$  — абс. магн. проницаемость,  $\sigma_0$  — уд. проводимость,  $B$  — плотность магн. потока (магн. индукция),  $\nu_A = B/(\rho\mu_0)^{1/2}$  — альвеновская скорость.

В электротехнике в случае подобия электр. цепей с распределенными параметрами основными П. к. являются  $L/Rt$  и  $C/Gt$ , где  $L$  — индуктивность,  $R$  — электр. сопротивление,  $C$  — ёмкость,  $G$  — элктр. проводимость.

Построены и используются П. к. для гидродинамич. стратифицир. сред (число Ричардсона), газокинетич. числа (число Марангони) и дисперсных систем, лучистого теплообмена (числа Плянка, Бугера, Больцмана) и др. физ. процессов.

Лит.: Обозначения, единицы измерения и терминология в физике, «УФН», 1979, т. 129, с. 291; Кузнецов С. С., Анализ подобия в физическом моделировании, Новосибирск, 1986; см. также лит. при ст. *Подобия теория, Моделирование*. С. Л. Вишневецкий.

**ПОДОБИЯ ТЕОРИЯ** — учение об условиях подобия физ. явлений. П. т. основана на учении о размерностях физ. величин (см. *Размерностей анализ*) и служит основой *моделирования*. П. т. устанавливает критерии подобия разл. физ. явлений, позволяющие с их помощью изучать свойства самих явлений. Явные и неявные функциональные связи между критериями подобия, к-рые получают с помощью П. т. (т. е. критериальные зависимости) способствуют пониманию сложных физ. процессов и помогают интерпретировать результаты как эксперим. исследований, так и числ. расчётов, объём к-рых прогрессивно возрастает по мере развития числ. методов и совершенствования ЭВМ. П. т. позволяет формулировать физ. закономерности и извлекать идеи из огромной массы расчётных или эксперим. результатов.

Физ. процесс (явление) может определяться полем характеризующих его физ. величин  $\Phi$ , т. е. распределением этих величин в пространстве с координатами  $x_1, x_2, x_3$  и во времени  $t$ :

$$\Phi = f(x_1, x_2, x_3, t).$$

В безразмерной форме поле описывается зависимостью

$$\bar{\Phi} = f^*(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{t}),$$

где безразмерная зависимость переменная  $\bar{\Phi}$  может представлять собой либо отношение  $\Phi$  к нек-рому характерному её значению  $\Phi_0$ , либо безразмерную комбинацию, в к-рую обязательно входит величина  $\Phi_0$ . То же относится к безразмерным величинам  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{t}$ . Переход к безразмерным переменным позволяет устанавливать подобие полей физ. величин.

Физ. явления, процессы или системы подобны, если в сходственных моменты времени в сходственных точках пространства значения переменных величин, характеризующих состояние одной системы, пропорц. соответствующим величинам другой системы. Физ. подобие является обобщением элементарного и наглядного понятия геом. подобия, при к-ром существует пропорциональность (подобие) сходственных геом. элементов подобных фигур или тел. При физ. подобии поля соответствующих (однородных) параметров двух систем подобны в пространстве и во времени. Напр., при кинемат. подобии существует подобие полей скорости для двух рассматриваемых движений; при динамич. подобии реализуется подобие систем действующих сил или силовых полей разл. физ. природы (сил тяжести, сил давле-

ния, сил вязкости и т. п.); механич. подобие (подобие двух потоков жидкости или газа, подобие двух упругих систем и т. п.) предполагает наличие геом., кинематич. и динамич. подобий; при подобии тепловых процессов подобны соответствующие поля темп-р и тепловых потоков, при электродинамич. подобии — поля токов, нагрузок, мощностей, эл.-магн. сил. Все перечисленные виды подобия — частные случаи физ. подобия.

Физ. процесс полностью описывается век-рой (замкнутой в матем. смысле) системой осн. ур-ний, т. е. системой зависимостей между физ. величинами вида

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где  $y_i$  — искомая (неизвестная) переменная,  $x_j$  — независимые переменные. Величины  $x_j$  разбиваются на две группы: в первую ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) входят  $k$  определяющих величин с независимыми размерностями, а во вторую ( $y_i, x_{k+1}, \dots, x_n$ ) — величины, размерности к-рых выражаются через размерности величин первой группы. В силу т. н. П-теоремы всякая зависимость размерной физ. величины от размерных определяющих параметров может быть представлена в виде зависимости безразмерной величины П от безразмерных комбинаций определяющих параметров  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}$ , причём число этих безразмерных комбинаций  $n-k$  меньше, чем общее число размерных определяющих параметров, на число определяющих параметров с независимыми размерностями. Числ. значения безразмерных величин  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}$  при переходе от одной системы единиц измерений к другой (внутри данного класса явлений) остаются неизменными. Безразмерные комбинации определяющих параметров являются *подобия критериями*. Любая комбинация из критериев подобия также представляет собой критерий подобия, но существенными для построения функциональных (критериальных) зависимостей являются лишь  $n-k$  независимых критериев подобия.

Напр., установившееся обтекание тела произвольной формы (самолёт, подводная лодка) потоком несжимаемой вязкой жидкости определяется (при скоростях, не близких к скорости звука) характерным размером тела  $l$ , скоростью  $v$  невозмущённого потока далеко впереди тела и кинематич. коэффициентом вязкости жидкости  $\nu$ . Т. к. в системе СИ  $\nu$  измеряется в  $\text{м}^2/\text{с}$ , т. е. его размерность выражается через размерности  $l$  и  $v$ , то из трёх размерностей определяющих параметров  $m, m/\text{с}, \text{м}^2/\text{с}$  лишь две независимые. Т. о.,  $n = 3, k = 2, n - k = 1$ , т. е. имеется лишь одна безразмерный критерий подобия — *Рейнольдса число*  $Re = vl/\nu$ . Все безразмерные параметры, характеризующие обтекание тела, являются ф-циями этого критерия, напр. безразмерные *аэродинамические коэффициенты* лобового сопротивления  $C_x$  и подъёмной силы  $C_y$ . Если эти коэф. определяются путём испытания моделей в аэродинамич. трубах или гидротрубах, то необходимо, чтобы величина  $Re$  при испытаниях модели, геометрически подобной натурному объекту, была такой же, как при движении натурного объекта.

Два физ. процесса или явления подобны, если по заданным характеристикам одного можно получить характеристики другого простым пересчётом, к-рый аналогичен переходу от одной системы единиц измерения к другой. Для осуществления пересчёта необходимы коэф. пропорциональности (коэф. подобия) — *переходные масштабы*. Размерные физ. параметры, входящие в критерии подобия, могут принимать для подобных систем сильно различающиеся значения, одинаковыми должны быть лишь безразмерные критерии подобия. Это свойство подобных систем и составляет основу моделирования.

С развитием исследований сложных физ. и физ.-хим. процессов, включающих механич., тепловые, хим. и иные явления, развиваются и методы П. т. для этих процессов; напр., устанавливаются условия подобия процессов трения и износа узлов и деталей машин, ки-

метики физ.-хим. превращений, подобия и моделирования планетных атмосфер и др.

Если в рассматриваемых физ. явлениях или системах существует равенство во всех, а лишь нек-рых независимых критериях подобия, то говорят о неполном, или частичном, подобии. Такой случай наиб. часто встречается на практике. При этом важно, чтобы влияние критериев, равенство к-рым не соблюдается, было незначительно или малосущественно на протекание рассматриваемых физ. процессов.

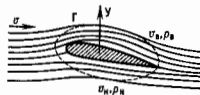
Практик. применение П. т. весьма обширно. Она даёт возможность предварительного качественно-теоретич. анализа и выбора системы определяющих параметров сложных физ. явлений. П. т. — основа для правильной постановки экспериментов и обработки их результатов. В сочетании с дополнит. соображениями, полученными из ур-ний, описывающих физ. явление, из экспериментов или числ. расчётов, П. т. приводит к новым существенным результатам.

Лит.: Седов Л. И., Методы подобия и размерности в механике, 10 изд., М., 1987; Дьяконов Г. К., Вопросы теории подобия в области физико-химических процессов, М., 1988. В кн.: Г. Ф. Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие, пер. с англ., М., 1983; Рухман А. А., Введение в теорию подобия, 2 изд., М., 1973; Веников В. А., Теория подобия и моделирование (применительно к задачам электроэнергетики), 2 изд., М., 1978; В в р е н б а т т Г. И., Подобие, пер. с англ., М., 1986. Анализ подобия и физическое моделирование. Новосибирск, 1986. С. Д. Вишневецкий, ПОДРЕШЕТКИ МАГНИТНЫЕ — см. Магнитная подрешётка.

**ПОДЪБАТА РЕАКЦИЯ** — прямая ядерная реакция, в результате к-рой ядро-мишень передаёт налетающей частице один или неск. нуклонов.

**ПОДЪЕМНАЯ СИЛА** — сила, перпендикулярная вектору скорости движения центра тяжести тела, возникающая вследствие несимметрич. обтекания тела потоком жидкости (газа). В двумерной модели движения крыла в идеальной и несжимаемой жидкости (рис. 1) несимметричное движение жидкости у границ крыла можно представить как сумму поступат. движения со скоростью  $v$  и циркуляц. движения интенсивностью  $\Gamma$ . В суммарном течении при выбранном направлении циркуляц. скорость у ниж. границы профиля будет меньше, а давление больше, чем у верхней

Рис. 1. Схема обтекания профиля крыла самолёта. Скорость  $v_a < v_b$ , давление  $p_a > p_b$ .



(см. Бернулли уравнение). Интеграл от давления по контуру профиля крыла даст П. с.  $Y$ , перпендикулярную скорости набегающего потока  $v$ . П. с.  $Y$  будет зависеть от величины циркуляц. скорости  $\Gamma$  и, согласно Жуковского теореме, для участка крыла длиной  $L$  (вдоль размаха)  $Y = \rho v \Gamma L$ , где  $\rho$  — плотность среды.

Поскольку  $\Gamma$  имеет размерности  $[v^2]$  ( $l^2$  — размерность длины), то П. с. можно выразить равенством  $Y = C_y \rho S v^2 / 2$ , где  $S$  — величина характерной для тела площади (диан., площадь крыла в плане, равная  $Lb$ , если  $b$  — длина хорды профиля крыла),  $C_y$  — безразмерный коэф. П. с., зависящий в общем случае от формы тела, его ориентации и среднел. чисел Рейнольдса  $Re$  и Маха  $M$ . Значение  $C_y$  определяют теоретич. расчётом или экспериментально. Так, согласно теории Жуковского, для крыла бесконечного размаха в плоскопараллельном потоке при небольших углах атаки  $C_y = 2\pi(\alpha - \alpha_0)$ , где  $\alpha$  — угол атаки (угол между направлением скорости набегающего потока и хордой крыла),  $\alpha_0$  — угол атаки при нулевой П. с.,  $m$  — коэф., зависящий только от формы профиля крыла, напр. для тонкой слабоизогнутой пластины  $m = 1$ . В случае крыла конечного размаха  $L$  коэф.  $m = \pi/(1-2/\lambda)$ ,

где  $\lambda = L/b$  — удлинение крыла. Методы вычисления П. с. обобщены на случай обтекания решётки профилей и используются при расчёте лопаточных машин (насосов, компрессоров и турбин).

В реальной жидкости в результате влияния вязкости величина  $m$  меньше теоретической, причём эта разница возрастает по мере увеличения относ. толщин профиля; значение угла  $\alpha_0$  также меньше теоретического. Кроме того, с увеличением угла  $\alpha$  зависимость  $C_y$  от  $\alpha$  (рис. 2) перестаёт быть линейной и величина  $dC_y/d\alpha$  монотонно убывает, становясь равной нулю при угле

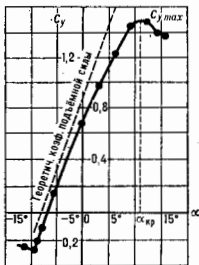


Рис. 2. Зависимость  $C_y$  от  $\alpha$ .

атаки  $\alpha_{cr}$ , к-рому соответствует макс. величина коэф. П. с.  $C_y$  макс. Дальнейшее увеличение  $\alpha$  ведёт к падению  $C_y$  вследствие отрыва пограничного слоя от верх. поверхности крыла и возрастания давления на ней. Величина  $C_y$  макс имеет существ. значение, т. к. чем она больше, тем меньше скорость взлёта и посадки самолёта.

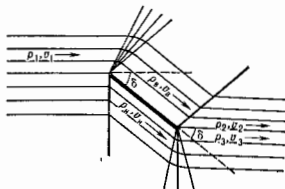
При больших, но докритич. скоростях, т. е. таких, для к-рых  $M < M_{кр}$  ( $M_{кр}$  — значение числа  $M$  набегающего потока, при к-ром вблизи поверхности профиля местные значения числа  $M = 1$ ), становится существенной сжимаемость газа. Для слабоизогнутых и тонких профилей при малых  $\alpha$  сжимаемость можно приближённо учесть, положив

$$\alpha' = \alpha \sqrt{1 - M^2}, \quad C_y = (C_y)_{несж} / \sqrt{1 - M^2}.$$

При сверхзвуковых скоростях характер обтекания существенно меняется. Так, при обтекании плоской пластины идеальным сжимаемым газом у её передней кромки на верх. поверхности образуются волны разрежения, а на нижней — ударная волна (рис. 3). В ре-

Рис. 3. Схема сверхзвукового обтекания пластины:

$v_a > v_b$ ,  $p_a < p_b$ ;  
 $v_a < v_b$ ,  $p_a > p_b$ ;  
 $v_a < v_b$ ,  $p_a > p_b$ ;  
 $v_a > v_b$ ,  $p_a < p_b$ .



зультате давления  $p_n$  на ниж. поверхности пластины становится больше, чем на верхней ( $p_n$ ); возникает суммарная сила, нормальная к поверхности пластины, составляющая к-рой, перпендикулярная к скорости набегающего потока, и есть П. с. Для малых  $M > 1$  и малых  $\alpha$  П. с. пластины может быть вычислена по ф-ле  $C_y = 4\alpha \sqrt{M^2 - 1}$ . Эта ф-ла справедлива и для тонких профилей произвольной формы с острой передней кромкой.

При обтекании тел сложной формы, напр. спускаемых в атмосферу Земли и планет комоч. летат. аппаратов, П. с. определяют экстрем. путем на основании испытаний геометрически подобных моделей в аэродинамич. трубах и газодинамич. стендах.

Лит.: Л о й с и й с к и й Л. Г., Механика жидкости и газа, 6 изд., М., 1957; С е л о в Л. И., Механика сплошной среды, 4 изд., т. 1—2, М., 1953—54. М. Я. Юдович.

**ПОЗИТРОН** (символ  $e^+$ ) [от лат. *positivus*] — положительный ил. ...трон] — элементарная частица с положит. эл. зарядом, антиматерия по отношению к электрону ( $e^-$ ). Массы ( $m_0$ ) и спины ( $J$ ) П. и электрона равны, а их электрич. заряды ( $e$ ) и магн. моменты ( $\mu_0$ ) равны по абс. величине, но противоположны по знаку:  $m_0 \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$  г,  $J = \frac{1}{2}$ ,  $e \approx 4,8 \cdot 10^{-10}$  СГСЭ единиц,  $\mu_0 = 1,00116$  (в единицах магнетона Бора).

Теоретически существование положительного заряж. «двойника» электрона следует из *Дирака уравнения*; эта возможность была указана П. Дираком (Р. А. М. Dirac) в 1931. В 1932 К. Д. Андерсон (С. D. Anderson) экспериментально обнаружил такую частицу в *космических лучах* и назвал её «П.». Открытие П. имело фундам. значение: в отличие от известных к сер. 1932 электрона, протона и нейтрона, П. не входил в состав «обычного» вещества на Земле, — возникли понятия античастицы и *антиматерии*. Предсказанные Дираком и наблюдаемые на опыте в 1933 процессы *аннигиляции* пары и *рождения* пары  $e^+e^-$  были первыми убийств. проявлениями взаимопревращения элементарных частиц.

П. участвует в эл.-магн., слабом и гравитач. взаимодействиях и относится к классу *лептонов*. По статистич. свойствам он является *фермионом*. П. стабилен, по в веществе существует короткое время из-за аннигиляции с электронами; напр. в спичке П. аннигилирует в среднем за  $5 \cdot 10^{-11}$  с. При определенных условиях, прежде чем аннигилировать, П. и электрон могут образовать связанную систему — *позитроний*.

П. рождаются при взаимопревращениях свободных элементарных частиц (напр. при распадах положит. *мюона*, в процессах рождения пар  $e^+e^-$   $\gamma$ -квантами в электростатич. поле атомного ядра, при *бета-распаде* нек-рых радиоакт. изотопов) П., получаемые при  $\beta$ -распаде и рождении пар, используются для исследовательских целей: изучение процессов замедления П. в веществе в их последующей аннигиляции даёт информацию о физ. и хим. свойствах вещества, напр. о распределении скоростей электронов проводимости, о дефектах кристаллич. решётки, о кинетике нек-рых типов хим. реакций. Один из методов исследования элементарных частиц при сверхвысоких энергиях основан на столкновении *встречных пучков* ускоренных П. и электронов.

Лит.: Д и р а к П. А. М., Принципы квантовой механики, пер. с англ., 2 изд., М., 1971; Г о л ь д а к и н В. И., Физическая химия позитрона и позитрония, М., 1968.

Э. А. Тагирова.

**ПОЗИТРОНИЙ** (хим. символ  $P^+$ ) — связанная водородоподобная система  $e^+e^-$ , состоящая из электрона и позитрона. Размеры П. примерно в два раза превышают размеры атома водорода (т. к. приведенная масса П. равна  $\frac{1}{2} m_0$ , где  $m_0$  — масса электрона), а его энергия связи в два раза меньше. П. образуется при столкновениях медленных позитронов с атомами вещества и захвате позитроном ат. электрона. В зависимости от взаимной ориентации спинов электрона и позитрона различают ортопозитроний (спины  $e^+$  и  $e^-$  параллельны) и парапозитроний (спины антипараллельны). П. — нестабильная система, т. к. электрон и позитрон очень быстро аннигилируют в  $\gamma$ -кванты; в силу сохранения *зарядовой чётности* равнозарядный аннигилирует в два  $\gamma$ -кванта (за время  $1,25 \cdot 10^{-10}$  с), а ортопозитроний — в три  $\gamma$ -кванта (за время  $1,4 \cdot 10^{-7}$  с). Уровень энергии осн. состояния равнозарядитория на  $8,41 \cdot 10^{-4}$  эВ ниже, чем у ортопозитрония, и в магн.

поле между ними возможны переходы. Поскольку П. — простейшая система, связанная чисто эл.-магн. силами (без участия сильного взаимодействия), изучение свойств свободного П. представляет особый интерес для проверки справедливости квантовой электродинамики. Результаты расчётов свойств П. прекрасно согласуются с данными опытов.

Свойства П. в веществе, в частности время его жизни в нём, отличаются от характеристик свободного П. и зависят от свойств вещества. Это позволяет использовать П. для изучения физико-хим. особенностей структуры веществ, напр. исследовать с его помощью быстрые хим. реакции, скорость протекания к-рых сравнима с временем жизни П. Для этого измеряют, напр., изменение времени жизни П. или величину распределения уровней энергий орто- и парасостояний.

Лит.: Г о л ь д а к и н В. И., Физическая химия позитрона и позитрония, М., 1968; Г о л ь д а к и н В. И., Ф и р с о в В. Г., Химия новых атомов, «Успехи химии», 1971, т. 40, в. 8, с. 1353. Л. И. Пономарев.

**ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ** — то же, что *координатные детекторы*.

**ПОЙНТИНГА ВЕКТОР** — вектор плотности потока энергии эл.-магн. поля  $S = (c/4\pi)[E]H]$  (в системе СГС), где  $E$  и  $H$  — напряжённости электрич. и магн. полей. П. в. по модулю равен кол-ву энергии, переносимой через единичную площадку, перпендикулярную к  $S$ , в единицу времени. Поскольку тангенциальную к границе раздела двух сред компоненты  $E$  и  $H$  непрерывны, вектор  $S$  непрерывен на границе двух сред. Плотность кол-ва движения эл.-магн. поля определяется вектором  $S/c^2$ . В этом соотношении проявляется материальность эл.-магн. поля. П. в. входит в состав тензора плотности энергии-импульса *электромагнитного поля*. Понятие П. в. было введено в теореме Пойнтинга через 10 лет после общей формулировки Н. А. Умовым (1874) понятия потока энергии в среде, поэтому П. в. в литературе часто называют вектором Умова — Пойнтинга.

Лит. см. при ст. *Пойнтинга теорема*. А. Н. Васильев.  
**ПОЙНТИНГА ТЕОРЕМА** — теорема, описывающая закон сохранения энергии эл.-магн. поля. Теорема была доказана в 1884 Дж. Пойнтингом (J. H. Poynting). Если процифференцировать по времени плотность энергии *электромагнитного поля* в стационарной среде без дисперсии,  $w = (DE + BH)/8\pi$ , с учётом *Максвелла уравнений* получим:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\operatorname{div} \mathbf{S},$$

где  $S = (c/4\pi)[E]H]$  — *Пойнтинга вектор*,  $j$  — плотность тока,  $E, H$  и  $D, B$  — напряжённости и индукции электрич. и магн. полей. В интегральной форме П. т. принимает вид

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\int_V \operatorname{div} \mathbf{S} dV - \oint_F \mathbf{S} dF,$$

где  $W$  — полная энергия эл.-магн. поля, заключённого в объёме  $V$ ;  $F$  — поверхность, ограничивающая объём  $V$ ;  $dF$  и  $dV$  — элементы поверхности и объёма. Это соотношение получено в предположении, что заряды не пересекают поверхность  $F$ , в противном случае необходимо учесть поток энергии, переносимый зарядами через  $F$ . Интеграл по объёму описывает работу, совершаемую сторонними элс над токами проводимости, и *джоулевы потери*. Исходя из представления о локализации эл.-магн. энергии в пространстве можно заключить, что она вытекает через поверхность  $F$  из объёма  $V$  наружу в кол-ве  $\oint_F \mathbf{S} dF$  единиц энергии в единицу времени. П. т. применяется чаще всего для определения потока энергии, теряемой системой заряд. частиц на излучение эл.-магн. волн, однако она справедлива и для статич. полей. В частности, с помощью П. т. можно проследить пути поступления энергии в проводник с током.

Для квазимонохроматич. эл.-магн. поля можно ввести комплексные амплитуды  $E_0(r, t)$  и  $H_0(r, t)$  эллектрич. и магн. полей, медленно меняющиеся во времени и пространстве, напр.  $E(r, t) = \text{Re}\{E_0(r, t) \times \exp(i(kr - \omega t))\}$ , где  $k$  и  $\omega$  — волновой вектор и круговая частота. При описании ВЧ-слоистых вещества (не ферромагнетика) с учётом пространств. и временной дисперсии волн нет необходимости вводить тензор магн. проницаемости, т. е.  $B = H$  (в СГС). Тензор диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ij}$  можно разложить на два эрмитовых тензора  $\epsilon'_{ij}$  и  $\epsilon''_{ij}$ :  $\epsilon_{ij} = \epsilon'_{ij} + i\epsilon''_{ij}$ . В поглощающей среде плотность джоулевых потерь равна  $\omega \epsilon''_{ij} E_{0j} E_{0i}^* / 8\pi$  (звёздочка означает комплексное сопряжение). В области прозрачности  $\epsilon''_{ij} = 0$  и средняя по высокой частоте плотность энергии

$$w = \frac{1}{16\pi} \left( \frac{\partial [\omega \epsilon'_{ij}(\omega, k)]}{\partial \omega} E_{0j} E_{0i}^* + H_{0i} H_{0i}^* \right).$$

Для этой области П. т. принимает вид

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (S^0 + S^1),$$

где вектор Пойнтинга  $S^0 = [E_0 H_0] c/8\pi$  описывает средний поток энергии, переносимый полем, а  $S^1 = -\omega (\partial \epsilon'_{ij} / \partial k) E_{0j} E_{0i}^* / 16\pi$  — средний поток энергии, переносимый частицами среды. Скорость переноса энергии в эл.-магн. волне совпадает с групповой скоростью волны  $v_{gr}$  и определяется соотношением  $S = w v_{gr}$ . Закон сохранения энергии в поглощающей среде при наличии временной и пространственной дисперсий не позволяет однозначно интерпретировать входящие в него члены.

Лит.: Тамм И. Е. Основы теории электричества, 10 изд., М., 1989; Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; и т. д.; Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Гинзбург В. Л., Угрюмов В. А., Несколько замечаний о силах и тензоре энергии-импульса в макроскопической электродинамике, «УФН», 1976, т. 118, с. 175; Агранович В. М., Гинзбург В. Л., Кристаллодинамика с учётом пространственной дисперсии и теории аксонов, 2 изд., М., 1979; Гинзбург В. Л., Замечания и статье Д. В. Скобельщина «Парadoxы квантовой теории эффектов Вавилова — Черенкова и Додлер», «УФН», 1977, т. 122, с. 325. А. Н. Васильев.

Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров  
 Ф 50 Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. — М.: Большая Российская энциклопедия. Т. 3 Магнитоплазменный — Пойнтинга теорема. 1992. 672 с., ил.

ISBN 5-85270-019-3 (т. 3)  
 ISBN 5-85270-034-7

380200000-06  
 Ф 007(01)-92 подписание

53(03)

ИБ № 185

Сдано в набор 17.04.90. Подписано в печать 13.06.91. Формат 84×108 1/16. Бумага типографская № 1. Гарнитура общинно-ленно-новая. Печать высокая. Усл. печ. л. 72,66; уч.-изд. л. 121,25; усл. кр.-отт. 79,8. Тираж 48 000 экз. Зак. № 2530. С. в.

Научное издательство «Большая Российская энциклопедия» 109817, г. Москва, Покровский бульвар, д. 8.

Московская типография № 2 Министерства печати и информации Российской Федерации, 129301, г. Москва, Проспект Мира, д. 105.