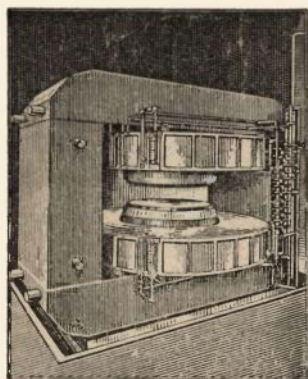


**АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ**

В. И. ВЕКСЛЕР

**УСКОРИТЕЛИ
АТОМНЫХ ЧАСТИЦ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

Член-корреспондент АН СССР

В. И. ВЕКСЛЕР

УСКОРИТЕЛИ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Москва—1956

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

академик

Д. В. СКОБЕЛЬЦЫН

ВВЕДЕНИЕ

Всего двадцать лет назад ученые, занимавшиеся исследованием атомного ядра, были людьми, далекими от практической жизни. Их исследования, проводившиеся в маленьких лабораториях и кабинетах, представлялись одним из самых абстрактных разделов человеческого знания.

Прошел относительно короткий срок, и как разительно изменилась картина. Наука об атомном ядре не только является сейчас одним из главнейших разделов физики, но эта наука породила совершенно новую, развивающуюся со сказочной быстротой атомную промышленность, привела к бурному развитию новых отраслей технологии и химии и на наших глазах постепенно приводит к перевороту в состоянии энергетических ресурсов.

Гениальное открытие Менделеева дало возможность ученым добиться превращения элементов, однако физикам пришлось долго и упорно трудиться, прежде чем они смогли осуществить эту задачу. Долгое время атомное ядро не поддавалось никаким воздействиям. Многократные попытки изменить время распада радиоактивных элементов или создать новые элементы оставались безуспешными. Необходимо было прежде всего найти способ эффективно воздействовать на ядро. Только после того, как это задача была разрешена, стало возможно выяснить природу сил, действующих внутри ядра, установить свойства частиц, входящих в его состав, и, наконец, поставить атомное ядро на службу человечеству.

Впервые путь к воздействию на атомное ядро был указан опытами знаменитого английского ученого Резерфорда, которому удалось вызвать расщепление ядра атома азота бомбардировкой его ядрами гелия, вылетающими с большой энергией при радиоактивном распаде радия.

Опыты Резерфорда показали, что для воздействия на ядра необходимо иметь частицы большой энергии, которые смогли бы проникнуть внутрь атомного ядра, воздействуя на ядро в целом и на отдельные частицы, входящие в его состав.

Мы знаем сейчас, что силы, действующие между частицами, входящими в состав атомного ядра, исключительно велики. Ядра представляют собой очень «прочные» образования. Повидимому, еще большие силы обуславливают существование тех относительно простейших кирпичей (протонов и нейтронов), из которых состоят ядра всех элементов.

Необходимо было создать какие-то способы искусственно сообщать мельчайшим частицам вещества — электронам, протонам, α -частицам такие большие энергии, которые позволили бы использовать эти частицы как своеобразные атомные снаряды. Бомбардируя ядра такими снарядами или изучая рассеяние разных частиц при соударении друг с другом, можно было бы сделать заключение об их свойствах и природе.

Так как ядра обладают положительным электрическим зарядом, то для возможности проникновения протона (т. е. ядра атома водорода) внутрь ядра свинца, необходимо, учитывая малые размеры ядра, сообщить протону энергию порядка 10 млн. электрон-вольт. Однако трудности проведения эксперимента этим не исчерпываются.

Ядра представляют собой «мишень» ничтожного размера. Если представить ядро атома в виде шарика, то для элемента среднего атомного веса радиус ядра, измеренный в сантиметрах, будет выражаться дробью, в знаменателе которой стоит единица с двенадцатью нулями (т. е. радиус будет равняться одной стомиллиардной доле миллиметра).

Необходимо, следовательно, не только научиться сообщать частицам большие энергии, но и создавать достаточно интенсивный поток таких частиц, так как только небольшому числу таких атомных снарядов «повезет» и они смогут попасть в такую малую мишень, как ядро атома.

Физические приборы, с помощью которых физики решают задачи создания такой атомной «артиллерии» получили название ускорителей.

На первых этапах развития науки об атомном ядре ускорители представляли собой небольшие приборы, помещавшиеся в обычных физических лабораториях. Современные ускорители — это огромные и сложные установки, весящие тысячи и даже десятки тысяч тонн, занимающие большие территории и потребляющие огромные количества электроэнергии. В отличие от обычных машин и механизмов, в этих установках нет каких-либо движущихся поршней, колес или рычагов. Однако мельчайшие частицы материи (электроны, протоны или ядра легких элементов) движутся в таких машинах с фантастической скоростью, практически равной скорости света.

Здесь мы попытаемся рассказать читателю об устройстве и принципах действия этих интереснейших средств научного исследования — ускорителей заряженных частиц.

Самым простым и распространенным ускорителем является обычная радиолампа. В радиолампе ускоряются электроны, испускаемые накаленной нитью — катодом лампы. На анод подается положительное напряжение порядка 100 вольт. Электрическое поле, созданное между катодом и анодом, ускоряет электроны, испускаемые накаленной нитью, и сообщает им энергию. Обычно энергию атомных частиц принято измерять в электрон-вольтах. Электрон-вольт — это энергия, которую получит частица с электрическим зарядом, равным заряду электрона, если она пройдет разность потенциалов в 1 вольт. Если на аноде радиолампы было 100 вольт, то энергия электронов, приходящих к аноду, будет равна 100 электрон-вольтам, что сокращенно пишется эв.

Если радиолампу можно рассматривать как ускоритель электронов, сообщаящий электронам энергию в несколько сотен электрон-вольт, то, например, в кинескопе телевизора электроны ускоряются до энергии порядка нескольких килоэлектрон-вольт. Только при такой, сравнительно большой энергии они будут вызывать достаточно яркое свечение флуоресцирующего экрана. В рентгеновской трубке электроны ускоряются уже до нескольких десятков и даже до нескольких сотен тысяч электрон-вольт.

Таким образом, не представляет какой-либо трудности ускорять электроны до сравнительно больших энергий. Аналогичным образом можно ускорять до этих энергий и ионы различных элементов.

Но если электроны или ионы нужно ускорить до энергии в миллион электрон-вольт или в несколько десятков миллионов электрон-вольт, то как создать необходимое для этого колоссальное напряжение? Может быть, можно ускорять частицы до очень больших энергий без применения сверхвысокой разности потенциалов?

История развития ускорителей дала ответ на эти вопросы.

В 1920—1930 гг. основные усилия ученых были направлены на создание высоковольтных установок, в которых, так же как в радиолампе или рентгеновской трубке, заряженные частицы достигают большой энергии, разгоняясь внутри вакуумной трубки, к электродам которой приложена достаточная высокая разность потенциалов. К 1930 г. удалось создать установку с разностью потенциалов 1—2 млн. вольт. В 1932 г. Кокрофт и Уолтон впервые осуществили ядерную реакцию с выделением энергии, пользуясь искусственно ускоренными протонами. В этих опытах они расщепили ядро лития протонами, ускоренными до энергии 0,7 млн. электрон-вольт.

Существенным вкладом в решение проблемы явился электростатический генератор Ван-де-Граафа, изобретенный в 1930 г. и представляющий удачное конструктивное сочетание электростатической машины с вакуумной трубкой. Область напряжений в несколько миллионов вольт была полностью освоена.

Очень скоро оказалось, что с помощью электростатической машины или высоковольтной выпрямительной установки нельзя сообщить заряженным частицам энергию, превышающую несколько миллионов электрон-вольт. Это обусловлено тем, что наличие большой разности потенциалов на электродах трубки, в поле которой двигаются ускоряемые частицы, всегда приводит к возникновению искры и пробоя.

Тогда перед учеными встал вопрос — нельзя ли создать такие условия, при которых заряженные частицы будут набирать энергию, много раз проходя через относительно небольшую разность потенциалов.

В 1932 г. американский ученый Лоуренс предложил и построил новый тип ускорителя, названный циклотроном. В циклотроне с помощью относительно небольшой разности потенциалов удалось ускорить протоны, дейтоны и

α -частицы до энергии в несколько миллионов электрон-вольт, а затем и в несколько десятков миллионов электрон-вольт.

Фактически, история ускорителей начинается с циклотрона.

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Для того чтобы понять принцип работы современных ускорителей, и в частности циклотрона, надо знать некоторые закономерности движения заряженных частиц в магнитном поле.

На частицу, обладающую зарядом и движущуюся по инерции в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, действует сила, искривляющая траекторию движения и заставляющая эту заряженную частицу двигаться по окружности. Сила, действующая со стороны магнитного поля на заряженную частицу, называется силой Лоренца и равняется

$$F_{\text{л}} = \frac{Hev}{c},$$

где c — скорость света, e — заряд частицы, v — проекция скорости частицы на плоскость, перпендикулярную к направлению магнитного поля, H — напряженность магнитного поля.

Так как сила Лоренца всегда перпендикулярна направлению магнитного поля и скорости частиц, то, изменяя направление движения, она не совершает работы и не может изменить величину скорости частицы.

В постоянном магнитном поле заряженная частица будет двигаться точно по окружности. Радиус окружности определяется равенством центростремительной силы

$$F_{\text{ц}} = \frac{Mv^2}{R},$$

возникающей при круговом движении, и силы Лоренца $F_{\text{л}}$, т. е.

$$\frac{Mv^2}{R} = \frac{Hev}{c}. \quad (1)$$

Отсюда легко найти радиус окружности:

$$R = \frac{Mvc}{He}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что радиус окружности (орбиты), по которой движется частица в однородном магнитном поле, пропорционален скорости этой частицы. Время T , в течение которого частица совершает полный оборот по окружности, будет равно:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi Mc}{He}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что если масса частицы постоянна, то время T не зависит от ее скорости, так как радиус орбиты, т. е. путь, проходимый частицей, сам пропорционален скорости; следовательно, отношение пути к скорости от величины скорости не зависит.

Этот важный факт и натолкнул Лоуренса на идею резонансного ускорения.

ЦИКЛОТРОН

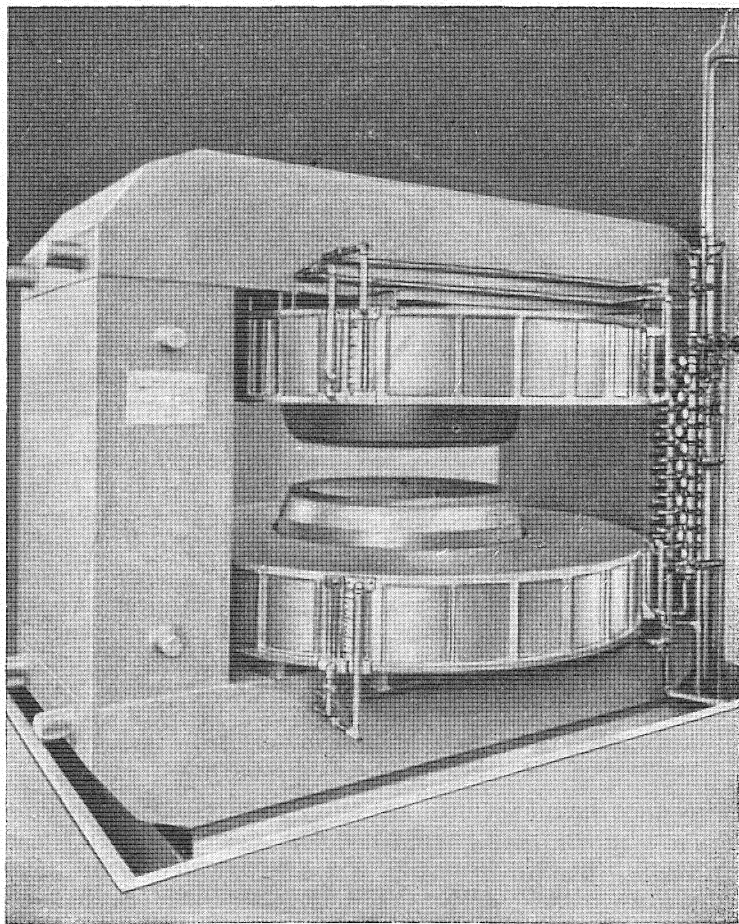
Когда частица движется в постоянном магнитном поле, то ее энергия остается постоянной. Для того чтобы увеличить энергию заряженной частицы, необходимо заставить эту частицу проходить через какое-то электрическое поле, которое будет ускорять ее.

Лоуренс заметил, что, воспользовавшись постоянством периода обращения, можно заставить частицу вращаться в магнитном поле по окружности и непрерывно увеличивать свою энергию. Для этого надо разместить в магнитном поле ускоряющие электроды и наложить на них переменную во времени разность потенциалов.

В циклотроне переменное электрическое поле создается между двумя электродами, имеющими следующее устройство. Представим себе полую круглую металлическую коробку, разрезанную пополам по диаметру. Между двумя половинками коробки — дуантами, создается переменная разность потенциалов. Дуанты помещаются внутри вакуумной камеры, расположенной в зазоре между полюсами электромагнита постоянного тока. Обычно полюсы электромагнита циклотрона имеют диаметр 0,5—1,5 м, а высота зазора достигает 20—50 см (см. фиг. 1).

В вакуумной камере, вертикальные стенки которой делаются из немагнитного металла, поддерживается вакуум в пределах 10^{-5} мм рт. ст. В середину щели между

дуантами помещается какой-либо источник, испускающий ионы.

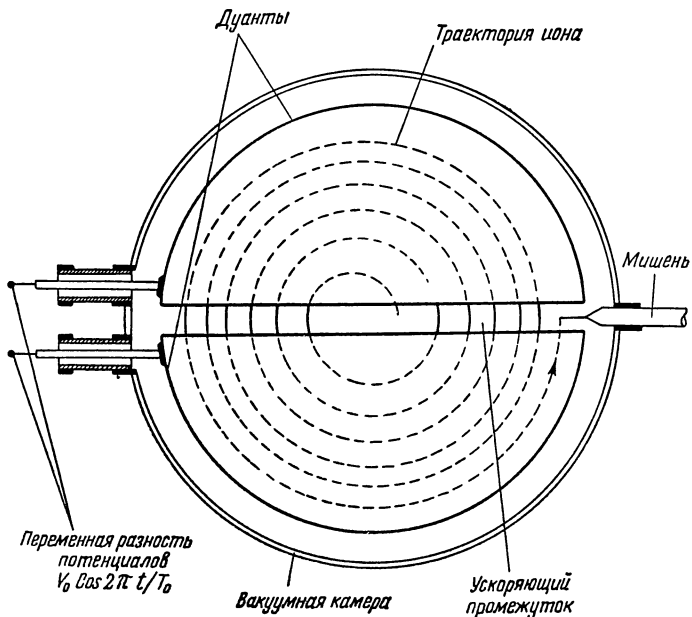


Фиг. 1. Типичный магнит циклотрона без ускорительной камеры

Представим себе, что величина напряженности магнитного поля H циклотрона и период изменения ускоряющего электрического переменного поля T_0 подобраны так, что ион массы M , двигаясь в магнитном поле по

окружности, делает поворот за время $\frac{T}{2}$, равное полупериоду высокой частоты $\frac{T_0}{2}$.

Очевидно, что если ион попадает в щель между дуантами, когда электрическое поле достаточно велико и име-



Фиг. 2. Схема движения ионов в камере циклотрона под действием магнитного поля, перпендикулярного к рисунку, и ускоряющего электрического поля в щели между дуантами

ет нужное направление, то он ускорится. Сделав поворот за время, равное полупериоду переменного электрического поля, ион вернется к ускоряющей щели дуантов в тот момент, когда разность потенциалов на дуантах переменит свой знак; следовательно, этот ион опять ускорится полем. На вторую половину оборота ион снова затратит время, равное полупериоду, и, следовательно, в третий раз подойдет к ускоряющей щели тогда, когда электрическое поле снова будет направлено так же, как оно было направлено при первом ускорении этого иона.

Легко убедиться в том, что такой режим будет сохраняться и при всех последующих прохождениях иона через ускоряющий зазор дуантов.

Таким образом, движение иона и изменение электрического поля происходят, как говорится, в резонанс. Ион изменяет направление своего движения одновременно с изменением направления электрического поля в щели между дуантами. Поэтому ион, вышедший в какой-то момент времени из источника, будет резонансно ускоряться, двигаясь по спирали с непрерывно возрастающим радиусом, до тех пор, пока он не достигнет большой энергии и не дойдет до внешней стенки камеры. Здесь этот ион либо выпускается наружу через окошечко, закрытое тонкой фольгой, либо попадает на мишень, расположенную на внешнем радиусе камеры. Сталкиваясь с каким-либо из ядер атомов мишени, ион большой энергии вызывает исследуемую ядерную реакцию.

Приведенное выше описание работы циклотрона идеализировано. Существует физическое явление, связанное с зависимостью массы частиц от скорости. Известно, что в точном соответствии с предсказаниями теории относительности Эйнштейна масса любого тела зависит от скорости, с которой это тело движется. В обыденной жизни, при небольших скоростях тел, с которыми мы имеем дело, это явление незаметно. Однако оно приобретает большое значение при движении заряженных частиц в ускорителях.

Теория относительности показывает, что масса ионов зависит от их скорости по следующему закону:

$$M = \frac{M_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (4)$$

где M_0 — масса покоящихся ионов. Пока скорость ионов в циклотроне очень мала по сравнению со скоростью света c , масса M остается практически равной массе M_0 , так как членом $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ можно пренебречь при $v \ll c$, и все приведенные рассуждения справедливы.

Однако по мере возрастания скорости частиц масса этих частиц возрастает и, как видно из формулы (3), возрастает период обращения ионов в магнитном поле. Это обусловлено тем, что при возрастании массы M радиус

окружности R будет возрастать не пропорционально скорости v , а быстрее, и поэтому время обращения иона, равное отношению длины окружности $2\pi R$ к скорости этой частицы, также будет возрастать.

Возрастание времени обращения иона приводит к тому, что резонанс (равенство) между периодом обращения T и периодом изменения ускоряющего иона электрического поля дуантов T_0 нарушается. Ионы начинают «запаздывать» и приходят в ускоряющую щель дуантов в такие моменты времени, при которых электрическое поле все больше и больше отличается от первоначального значения, когда ион начинает свое движение. В процессе многократного «запаздывания» резонанс все более нарушается, пока, наконец, при каком-то очередном прохождении ион не попадает в щель между дуантами в такой момент времени, когда электрическое поле будет уже не ускорять, а тормозить частицы. Начиная с этого момента, дальнейшее увеличение энергии ионов невозможно.

Простой расчет показывает, что максимальная энергия, которую ион может получать в циклотроне, выражается формулой:

$$W_{\max} = 2 \sqrt{\frac{eV_0 M_0 c^2}{\pi}}, \quad (5)$$

где V_0 — амплитуда разности потенциалов между дуантами, $M_0 c^2$ — собственная энергия покоящейся частицы, равная 938,1 млн. электрон-вольт для протона и 0,511 млн. электрон-вольт для электрона¹. В самом мощном работающем циклотроне V_0 равно 410 киловольтам. Поэтому максимальная энергия, которую получают протоны в таком циклотроне, близка всего только к 22 млн. электрон-вольт.

Из приведенной формулы ясно, что циклотрон практически совершенно не пригоден для ускорения электронов до больших энергий, так как максимальная энергия, которая может быть сообщена электрону в циклотроне, очень мала, и гораздо проще может быть достигнута прямым ускорением.

¹ Формула (5) указывает практическую предельную энергию. Теоретический предел энергии, достижимой в циклотроне для совершенно однородного магнитного поля и очень маленькой интенсивности, в два раза больше.

Из формулы (5) видно, что предельная энергия, которую можно сообщить ядрам атомов дейтерия (тяжелого водорода) в циклотроне, примерно на 40% больше, чем для протонов. Максимальная энергия α -частиц в $\sqrt{2 \cdot 4} = 2,8$ раза больше, чем для протонов.

КАК УВЕЛИЧИТЬ ПРЕДЕЛ ДОСТИЖИМЫХ ЭНЕРГИЙ

В 1934—1944 гг. происходило интенсивное внедрение циклотрона в физические лаборатории всего мира. Один из первых циклотронов был построен в Советском Союзе. Однако уже в 1940 г. стало ясно, что развитие ядерной физики требует создания ускорителей, позволяющих сообщать атомным частицам гораздо большую энергию, чем та, которую может обеспечить циклотрон.

Оказалось, что для изучения природы ядерных сил и исследования тех, относительно простейших, а в действительности также очень сложных, частиц, которые входят в состав ядра и обычно называются нуклонами (протоны, нейтроны), необходимо исследовать поведение и свойства этих частиц при энергиях гораздо больших, чем те, которые можно получить с помощью циклотрона. Изучение космических лучей и открытия, которые были при этом сделаны, показали, что природа ядерных сил может быть полностью выявлена только в том случае, если мы научимся сообщать протонам или дейтонам энергию, во много раз большую той, которую дает циклотрон.

На первый взгляд кажется, что существует очень простой путь решения задачи. В самом деле, ведь достаточно сделать полюсы электромагнита такими, чтобы магнитное поле в зазоре циклотрона нарастало с увеличением расстояния от центра полюсов. Таким образом удалось бы добиться постоянства периода обращения при любых энергиях частиц [см. формулу (3)]. Действительно, чем больше магнитное поле, тем меньше радиус той окружности, по которой двигается частица в циклотроне [см. формулу (2)]. Поэтому, если при увеличении энергии частицы радиус окружности возрастает быстрее скорости, то путем простого увеличения магнитного поля вдоль радиуса орбиты можно было бы заставить радиус траектории частиц возрастать пропорционально скорости. В этом случае, как было объяснено выше, период обращения частиц

$(T = \frac{2\pi R}{v})$ оставался бы постоянным и нарушения резонанса в циклотроне не происходило бы. Эта идея высказывалась некоторыми физиками.

Однако практически она неосуществима. Здесь мы встречаемся со второй очень характерной особенностью всех современных ускорителей. Речь идет об устойчивости движения частиц. Оказывается, что недостаточно научиться как-то ускорять частицы, необходимо еще, чтобы траектории, по которым движутся частицы в ускорителе, удовлетворяли требованию устойчивости движения. Это значит, что необходимо добиться того, чтобы частицы, почему-либо отклонившиеся от своей траектории, например из-за столкновения с молекулами газа, в процессе дальнейшего ускорения не только не увеличивали бы своего отклонения, но постепенно сводили бы его на нет.

Нарушения правильности движения частиц, которые принято называть «возмущениями», могут происходить как в вертикальном, так и в радиальном направлении. И вот оказывается, что для устойчивого движения частиц в циклотроне необходимо, чтобы магнитное поле, управляющее движением этих частиц, уменьшалось, а не увеличивалось к краям магнита, т. е. чтобы с увеличением радиуса траектории частица попадала в более слабое поле; наоборот, в случае уменьшения радиуса траектории частиц они должны попадать в более сильное поле.

Правда, изменение магнитного поля не должно быть чересчур сильным. При этом условии магнитные силы будут поддерживать устойчивость частиц как в вертикальном, так и в радиальном направлении. Это значит, что если какая-либо частица окажется, например, смещенной по отношению к плоскости симметрии зазора между полюсами магнита циклотрона, то возникнет магнитная сила, которая будет смещать частицу к этой плоскости. Если частица оказалась над средней плоскостью зазора, сила будет толкать ее сверху вниз; если частица оказалась ниже плоскости зазора, то магнитная сила будет выталкивать ее наверх. Под действием этой силы частица будет вести себя наподобие маятника, т. е. будет испытывать колебания около средней плоскости, и если энергия этой частицы возрастает, то колебания будут затухать с течением времени.

То же происходит и в радиальном направлении. Если магнитное поле спадает не слишком быстро, а именно не быстрее изменения центробежной силы, действующей на частицы [см. формулу (1)], то случайные отклонения частицы в радиальном направлении также будут приводить к возникновению колебаний.

Именно это требование устойчивости движения частиц в циклотроне по отношению к вертикальным возмущениям полностью исключает возможность поддерживать резонанс за счет увеличения магнитного поля к краям. Легко убедиться, что в этом случае движение частиц в вертикальном направлении было бы совершенно неустойчивым. Достаточно было бы частице отклониться от средней плоскости зазора на какую-то, даже очень малую, величину — а это всегда может произойти как за счет начальных тепловых скоростей частиц, испускаемых ионным источником, так и за счет влияния пространственного заряда ионов, столкновения с молекулами газа и т. п., — как сейчас же небольшое вначале отклонение начнет с огромной скоростью нарастать, и все частицы после одного-двух оборотов попадут на крышку камеры. Поэтому-то кажущееся столь простым решение вопроса на самом деле невозможно.

Было сделано и много других попыток решить задачу получения частиц большой энергии, однако все они остались безуспешными.

Стало казаться, и такая точка зрения получила широкое распространение среди физиков, занимающихся проблемой ускорения заряженных частиц, что получение частиц очень большой энергии не может быть достигнуто с помощью резонансного метода и что вообще эта задача сможет быть решена только в отдаленном будущем.

Действительность оказалась, однако, гораздо более благоприятной. Автору этих строк в 1944 г. удалось показать, что проблема получения частиц очень большой энергии может быть решена несколькими, в сущности очень простыми, способами. Все эти способы основаны на одном физическом явлении, которое удалось вскрыть при анализе резонансного ускорения частиц,двигающихся с очень большой скоростью. Это явление получило название автофазировки.

ПРИНЦИП АВТОФАЗИРОВКИ

Анализируя работу циклотрона, мы показали, что приращение массы частиц, происходящее в процессе ускорения, является причиной нарушения резонанса и приводит к тому, что через некоторое определенное число оборотов электрическое поле дуантов вместо ускорения начинает тормозить частицы. Это делает невозможным безграничное увеличение энергии частиц в циклотроне.

Посмотрим теперь, нельзя ли использовать это «вредное» для циклотрона нарастание массы частиц при увеличении их скорости в наших целях? Иными словами, нельзя ли создать такие условия, при которых период обращения частиц T , по крайней мере в среднем за много оборотов, автоматически поддерживался бы всегда равным периоду ускоряющего переменного поля T_0 именно за счет возрастания энергии частиц? Если бы нам удалось осуществить это требование, то очевидно, что важный для ускорения резонанс мог бы сохраняться сколь угодно долго, т. е. можно было бы ускорять частицы до сколь угодно больших энергий.

Спрашивается, как же это сделать?

Оказывается, что в принципе это очень просто и что сделать это можно несколькими способами.

Выше мы видели, что нельзя увеличивать магнитное поле вдоль радиуса, но можно, например, начать медленно увеличивать во времени магнитное поле в циклотроне, питая магнит переменным током. Тогда окажется, что в среднем частота обращения частиц по окружности автоматически будет поддерживаться равной частоте электрического поля, приложенного к дуантам.

Почему это происходит?

При каждом прохождении через щель дуантов частицы испытывают разное приращение массы (и соответственно разное приращение радиуса, по которому их заворачивает магнитное поле) в зависимости от того напряжения, которое имеется между дуантами в момент ускорения данной частицы. И вот оказывается, что среди всех частиц имеются такие выделенные «удачливые» частицы (они обычно называются равновесными), для которых механизм, автоматически поддерживающий постоянство периода обращения, особенно прост.

Грубо говоря, «удачливыми» являются те частицы, кото-

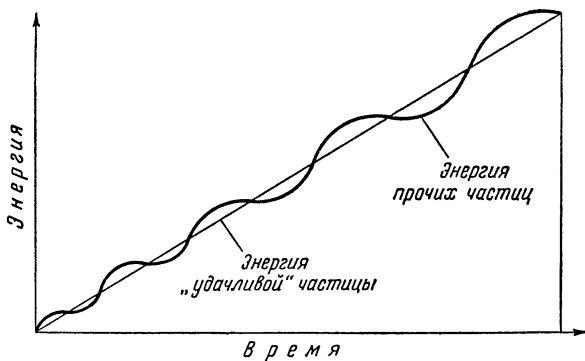
рые при каждом прохождении через щель дуантов испытывают такое дополнительное приращение массы и соответственно такое увеличение радиуса окружности (сверх увеличения радиуса пропорционального скорости), которое точно компенсирует уменьшение радиуса орбиты этих частиц, вызванное приращением магнитного поля за время их одного оборота.

Если такая компенсация происходит, то радиус орбиты возрастает пропорционально скорости, и, следовательно, время обращения частиц остается постоянным и равным периоду ускоряющего поля. Таким образом, равновесные частицы могут резонансно ускоряться до тех пор, пока происходит возрастание магнитного поля. Однако если бы дело ограничивалось только «удачливыми» частицами, а все остальные выпадали бы из процесса ускорения, то пользы от такого ускорителя было бы мало.

Достаточно было бы хоть немного нарушить ту точную компенсацию, о которой говорилось выше, как важный для ускорения резонанс быстро расстроился бы и произошло бы то же самое, что имеет место в циклотроне. Однако оказывается, что не только «удачливые» частицы сохраняют период обращения, равный периоду ускоряющего поля. Такой же способностью обладают и почти все остальные частицы, только, если так можно выразиться, достается это им с гораздо большим трудом.

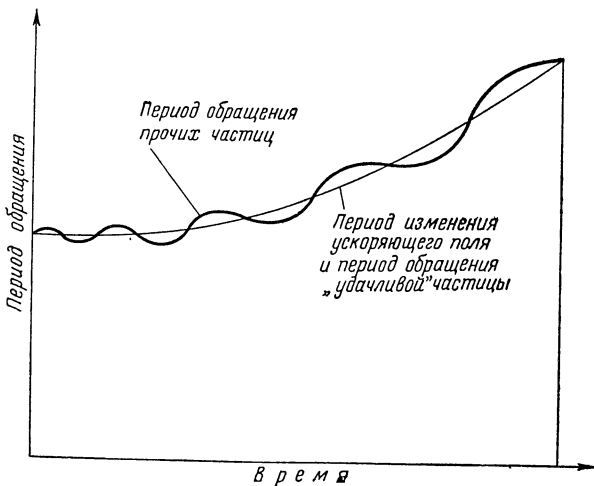
Тщательный анализ показывает, что частицы, почему-либо обладающие в данный момент избытком или недостатком энергии, т. е.двигающиеся по слишком большому или по слишком малому радиусу по сравнению с радиусом орбиты равновесных частиц, в процессе ускорения будут испытывать колебания около «равновесного радиуса». При этом энергия частиц оказывается то больше энергии равновесных частиц, то меньше; в среднем она равна энергии равновесных частиц (см. фиг. 3). Таким образом, практически почти все частицы участвуют в резонансном ускорении.

Совершенно так же обстоит дело и в том случае, если мы оставим магнитное поле циклотрона постоянным во времени и будем увеличивать период переменного электрического поля T_0 , приложенного к дуантам. И в этом случае для некоторых выделенных равновесных частиц будет



Фиг. 3. Схема, поясняющая действие автофазировки в процессе нарастания энергии ускоряемых частиц

происходить точное соблюдение резонанса в течение всего цикла ускорения, в то время как периоды обращения остальных частиц будут совершать колебания около периода обращения равновесных частиц (см. фиг. 4). При этом, в отличие от равновесных частиц, резонанс



Фиг. 4. Схема, поясняющая механизм автофазировки, который обеспечивает равенство периодов обращения частиц и периода изменения ускоряющего переменного электрического поля

(т. е. равенство периода обращения T и периода ускоряющего поля T_0) для всех остальных частиц будет осуществляться в среднем за довольно большой промежуток времени. Особенно важным является то обстоятельство, что в обоих этих случаях подобный режим будет иметь место всегда, при любом произвольном законе возрастания магнитного поля (или увеличения периода T_0 электрического поля) во времени, но при условии достаточной величины разности потенциалов на дуантах. Подобный режим называется «автофазировкой» потому, что частицы автоматически «выбирают» нужную им для поддержания резонансного ускорения фазу ускоряющего их электрического поля¹.

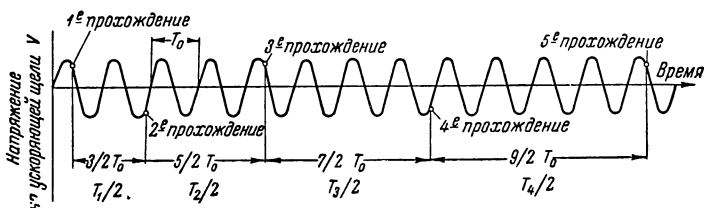
Может показаться, что для появления автофазировки и осуществления резонансного ускорения обязательно изменять во времени либо магнитное поле, либо период электрического. На самом деле это не так. Пожалуй, наиболее простой по идее (но далеко не простой по практическому осуществлению) способ ускорения, установленный автором раньше других способов, может быть реализован при неизменном во времени магнитном поле и постоянной частоте. Поясним в двух словах, как происходит в этом случае процесс ускорения.

Представим себе, что в обычном циклотроне мы наложим на дуанты очень большую разность потенциалов. Тогда частица, прошедшая через щель дуантов в такой момент времени, при котором разность потенциалов близка к максимальному значению, испытает очень большое приращение скорости. Масса ее в соответствии с формулой (4) также резко возрастает, и соответственно возрастает радиус окружности, по которой начнет двигаться эта частица, пройдя через ускоряющую щель дуантов.

Допустим, что до приращения энергии период обращения частицы T совпадал с периодом ускоряющего поля T_0 . Пусть в результате ускорения и соответствующего воз-

¹ Если разность потенциалов между дуантами изменяется по закону $V_0 \cos \frac{2\pi t}{T_0}$, то энергия, приобретенная частицей, прошедшей в момент t_1 щель между дуантами, равна $eV_0 \cos \frac{2\pi t_1}{T_0}$. Величину $\frac{2\pi t_1}{T_0} = \varphi$ называют фазой электрического поля. Таким образом приобретенная энергия равна $eV_0 \cos \varphi$.

растания радиуса частица затрачивает на пол-оборота интервал времени $\frac{T_1}{2}$, на величину ΔT больший, чем она затрачивала раньше. Очевидно, что если ΔT будет точно равно T_0 — периоду ускоряющего частицы электрического поля (а это всегда можно сделать, обеспечив соответствующее приращение энергии в щели дуантов), то при втором, третьем и т. д. прохождениях через ускоряющую щель дуантов эта частица все время будет испытывать одно и то же приращение энергии. После каждого ускорения промежуток времени, затрачиваемый частицей на то, чтобы сделать пол-оборота и снова вернуться в ускоряющий зазор, будет возрастать на величину ΔT , равную



Фиг. 5. Схема процесса ускорения электронов в микротроне, показывающая изменение периодов обращения электронов (T_1 , T_2 , T_3 , T_4) после последовательных проходов ускоряющей щели дуантов. T_0 — период изменения ускоряющего поля

периоду ускоряющего поля T_0 , и таким образом запаздывание, испытываемое всякий раз частицей, будет кратно целому числу периодов. Поэтому величина электрического поля, ускоряющего частицу, все время будет одинакова (см. фиг. 5).

Ускоритель, построенный по изложенному принципу, получил название кратного резонансного ускорителя, или микротрона¹.

Таким образом, в принципе, при постоянстве частоты переменного электрического поля и постоянстве магнитного поля возможно резонансно ускорять частицы до сколь угодно больших энергий. Автофазировка обеспечи-

¹ Последнее название связано с тем, что для практического осуществления ускорителя требуются мощные источники микро-радиоволн. Микротрон не получил еще широкого распространения, однако несколько ускорителей электронов на энергию до 4 мэв работает уже ряд лет.

вает устойчивость режима ускорения аналогично тому, как она действует в рассмотренных выше установках.

Мы постарались показать, каким образом принципиальное для физики больших скоростей явление зависимости массы частиц от скорости, оказавшееся столь «вредным» для работы циклотрона, позволило необычайно расширить возможность резонансного метода ускорения. Использование принципа автофазировки, обусловленного этой зависимостью, дало возможность исключительно быстро продвинуться вверх по шкале энергий.

После открытия принципа автофазировки, который независимо от автора этих строк, но несколько позднее (в 1945 г.) был установлен также американским ученым Мак-Милланом, началось быстрое создание разнообразных резонансных ускорителей, предназначенных для получения частиц с очень большой энергией.

С помощью современных резонансных ускорителей ионов удалось в тысячу раз увеличить верхний предел энергии частиц, который был получен в циклотроне. Сейчас построены ускорители, позволяющие ускорять протоны до энергии в несколько миллиардов электрон-вольт. Советскими физиками М. С. Рабиновичем, В. В. Владимирским, А. А. Коломенским и др., а также многими зарубежными исследователями были широко и всесторонне освещены самые разнообразные вопросы, касающиеся теории работы различных типов резонансных ускорителей, основанных на принципе автофазировки. Повидимому, с помощью ускорителей этого типа удастся ускорить частицы до еще большей энергии.

В зависимости от условий движения частиц, а также от того, что меняется в резонансном ускорителе — магнитное поле или период обращения, ускорители называются по-разному и устройство их различно.

Мы дадим краткую характеристику основных типов мощных современных ускорителей.

ФАЗОТРОН

Ускоритель, в котором медленно увеличивается во времени период переменного электрического поля, ускоряющего частицы, носит название фазотрона (за рубежом этот ускоритель часто называют синхроциклотроном).

Электромагнит фазотрона очень похож на магнит циклотрона, только его размер, конечно, гораздо больше. Так как траектории частиц в фазотроне, так же как и в циклотроне, заполняют все пространство вакуумной камеры, а предельный достижимый радиус орбит уже не ограничивается нарушением резонанса, то размер полюсов электромагнита фазотрона определяется той предельной энергией, которую хотят достигнуть на этом ускорителе.

Для обеспечения вертикальной устойчивости пучка ионов форма полюсов магнита в зазоре подбирается обычно таким образом, чтобы магнитное поле слегка спадало к краю. Для этого достаточно сделать зазор немного увеличивающимся к краям. Обычно спадение поля к краю не превосходит 3—5%. Это обеспечивает хорошую вертикальную фокусировку пучка и легкость настройки машины по сравнению с циклотроном.

Так же как и в циклотроне, в зазор полюсов фазотрона помещается вакуумная камера, внутри которой размещаются дуанты. Обычно в фазотроне имеется только один дуант, вторым электродом является сама вакуумная камера или специальная рамка. В камере поддерживается вакуум в пределах 10^{-5} мм рт. ст. Между дуантом и камерой создается переменная разность потенциалов, период изменения которой варьируется во времени. Амплитуда разности потенциалов, ускоряющая частицы в фазотроне, в отличие от циклотрона, не должна быть велика и обычно не превышает 15—20 киловольт. Такое низкое напряжение позволяет сделать зазор магнита относительно небольшим и тем самым уменьшить мощность системы питания магнита.

Фазотрон работает импульсно. В тот интервал времени, когда период переменного ускоряющего поля увеличивается, происходит ускорение частиц. Та часть цикла, в течение которого период уменьшается, возвращаясь к начальному значению, является нерабочей. Обычно фазотрон дает около 100 циклов (импульсов) в секунду. Из-за импульсной работы фазотрона средняя интенсивность ускоренных частиц значительно ниже, чем в циклотроне. Во время рабочей части цикла радиус траектории, по которой движутся частицы, возрастает по спирали до тех пор, пока частицы не достигнут максимальной энергии, после чего

эти частицы либо попадают на мишень, установленную на большом радиусе, либо выводятся из камеры ускорителя наружу с помощью специальных выводных устройств.

Научные исследования проводятся как внутри камеры фазотрона, так и с пучками, выведенными наружу. Точный эксперимент, конечно, легче поставить с пучком, выведенным наружу. Наиболее просто выводятся наружу нейтроны. Протоны, ударяясь о мишень, помещенную внутри вакуумной камеры, частично превращаются в нейтроны с небольшой потерей энергии. Магнитное поле не действует на нейтроны, так как эти частицы не обладают электрическим зарядом. Поэтому, двигаясь в магнитном поле фазотрона по прямой линии, нейтроны выходят из камеры и через специальные отверстия, сделанные в толстой защитной бетонной стене, попадают в помещение для проведения опытов.

Защитная стена нужна для того, чтобы уменьшить «фон», т. е. поглотить рассеянные частицы, создаваемые фазотроном, и обеспечить защиту персонала от поражающего действия пучка. Помимо нейтронов и протонов, на фазотронах обычно получают пучки π -мезонов с зарядами разных знаков. Эти частицы образуются при соударениях ускоренных протонов с атомными ядрами вещества, из которого сделана мишень, помещенная внутри камеры фазотрона. Отрицательные мезоны легко выводить наружу, используя магнитное поле самого фазотрона, так как знак их заряда противоположен знаку протона и поэтому они отклоняются полем в противоположную сторону, т. е. к внешней стенке вакуумной камеры.

Наиболее трудно вывести из камеры ускорителя протоны. В течение длительного времени удавалось вывести наружу менее чем 0,1% протонов, циркулирующих внутри камеры. Для этой цели внутрь камеры помещается специальное устройство, представляющее собой конденсатор (электростатический дефлектор), на который импульсно, на миллионную долю секунды, подается напряжение до 150 киловольт. Попадая в пространство между пластинками, протоны под действием электрического поля забрасываются на больший радиус и попадают в отверстие магнитного экрана, с помощью которого выводятся наружу. Магнитный экран представляет собой небольшой магнит, в сечении напоминающий букву «С». Он защищает про-

тоны,двигающиеся внутри магнитного экрана, от действия магнитного поля электромагнита фазотрона.

В последние годы в Институте ядерных проблем АН СССР и в Ливерпульском университете (Англия) проблема вывода решена совсем по-другому. Вместо электростатического дефлектора в камере осуществляют местные возмущения магнитного поля, так что пучок протонов направляется в отверстие магнитного экрана. Таким способом в Институте ядерных проблем удалось вывести наружу 5—8% (в Ливерпуле — 3%) всех протонов, ускоренных в фазотроне.

Самый большой в мире фазотрон (см. фиг. 6) построен в Советском Союзе, в Институте ядерных проблем, под руководством Д. В. Ефремова, М. Г. Мещерякова, А. Л. Минца.

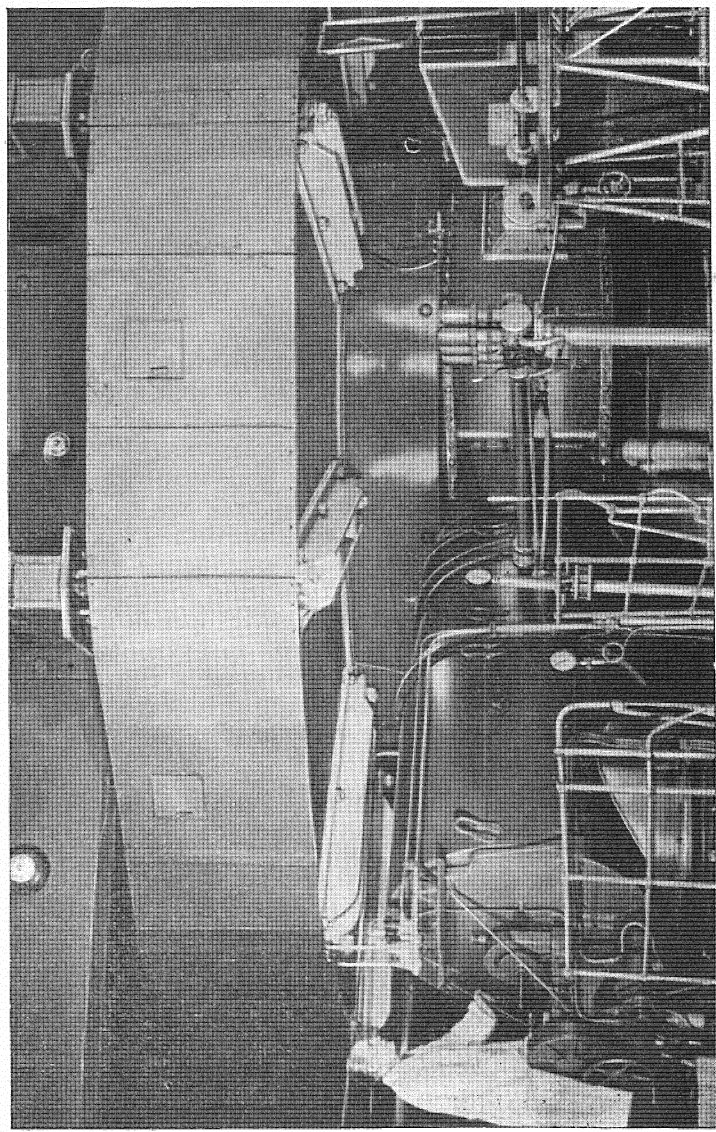
В настоящее время во всем мире имеется около десятка больших фазотронов. Для характеристик этих ускорителей мы приводим таблицу, в которой сведены некоторые данные, касающиеся крупных фазотронов мира.

Параметры крупнейших фазотронов мира

Учреждение	Диаметр полюсов, м	Магнитное поле, э	Энергия протонов, млн. эв	Средний ток ускоренных протонов, р. А	Вес магнита, т
Институт ядерных проблем АН СССР	6,0	17 000	680	0,3	7000
Калифорнийский университет (США)	4,7	15 000	350	0,75	4300
Чикагский университет (США)	4,3	18 600	450	—	2200
Колумбийский университет (США)	4,2	17 400	385	0,1	2400
Ливерпульский университет (Англия)	4,0	18 900	410	1,0	1700

Фазотроны являются незаменимыми орудиями исследования атомного ядра и тех простейших, так называемых «элементарных» частиц (протоны, нейтроны, мезоны), о которых мы говорили выше.

В частности, фазотроны являются сейчас основными орудиями исследований пучков π -мезонов. π -мезоны — это



Фиг. 6. Общий вид фазотрона (синхроциклотрона) Института ядерных проблем АН СССР

частицы, которые играют важную роль в теории ядерных сил и обладают массой, равной примерно 280 электронным массам. До тех пор, пока не были построены фазотроны, π -мезоны наблюдались в ничтожном количестве только в космическом излучении. Сооружение фазотронов позволило физикам впервые создать такие частицы искусственно в лаборатории, дало возможность подробно изучить свойства этих частиц, их взаимодействие с протонами, нейтронами, ядрами атома и установить их роль в строении вещества.

Несмотря на большую область применения фазотронов, практический предел энергии протонов, которые могут быть получены с помощью фазотронов, вряд ли превышает тысячу миллионов электрон-вольт. Это обусловлено тем, что для увеличения энергии протонов с помощью фазотронов необходимо было бы делать электромагниты, полюса которых достигали бы огромных размеров. Так как вес электромагнита фазотрона растет приблизительно пропорционально кубу максимальной энергии тех частиц, которые ускоряются между его полюсами, то для ускорения протонов до энергии, скажем, в три миллиарда электрон-вольт пришлось бы сделать электромагнит этого фазотрона весом в 300 000 тонн. Поэтому для ускорения ионов до больших энергий используется другой тип ускорителя.

В этом ускорителе, который называется синхрофазотроном, магнитное поле, управляющее траекторией частиц, является переменным во времени.

СИНХРОФАЗОТРОН

В фазотроне траектория частиц представляет плоскую спираль, разворачивающуюся из центра магнита и плотно заполняющую своими витками площадь круга, диаметр которого почти совпадает с диаметром полюсов электромагнита фазотрона. Если бы удалось осуществить такой способ ускорения, при котором траектории частиц заполняли бы не всю плоскость круга, а только, например, узкое кольцо на периферии этого круга, то вся средняя часть полюсов магнита фазотрона стала бы не нужной. Можно было бы построить ускоритель на очень большую энергию, имеющий значительно меньший вес, чем фазотрон.

Это дало бы возможность использовать для ускорения электромагниты, сделанные в виде узкого кольца с очень большим радиусом, и тем самым добиться получения частиц огромной энергии при вполне осуществимых практически весах и не слишком большой мощности, потребляемой подобными электромагнитами.

Такие ускорители действительно могут быть построены. Они носят название синхрофазотронов.

Задача состоит, следовательно, в том, чтобы заставить частицы различных скоростей (в начале ускорения скорость частиц очень мала, а к концу она делается равной скорости света) двигаться по окружности одного и того же радиуса.

Это можно сделать с помощью принципа автофазировки, при котором можно заставить частицы совершать движение с любым заданным изменяющимся периодом обращения. Период обращения частицы со скоростью v по окружности с радиусом R равен

$$T = \frac{2\pi R}{v}.$$

Если R — величина постоянная, то период обращения уменьшается обратно пропорционально скорости. Для резонансного ускорения частиц по орбите с постоянным радиусом период переменного электрического ускоряющего поля T_0 также должен равняться

$$T = T_0 = \frac{2\pi R}{v}. \quad (6)$$

На первый взгляд кажется, что для осуществления ускорения по постоянной окружности мы должны все время измерять скорость частиц и изменять в соответствии с ее значением период ускоряющего поля. На самом деле это не так. Выше [см. формулу (3)] мы показали, что радиус окружности, по которой движутся частицы в постоянном магнитном поле H , равен

$$R = \frac{Mv c}{He}, \text{ где } M = \frac{M_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Это же выражение будет справедливо и в нашем случае, когда магнитное поле медленно возрастает во вре-

мени. Поскольку R у нас постоянно, то произведение массы M на скорость v , т. е. импульс частицы P , оказывается всегда пропорциональным значению напряженности магнитного поля в данный момент времени $H(t)$

$$H(t) = \frac{M_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \cdot \frac{c}{Re} = \frac{Pc}{Re}.$$

Из приведенного равенства видно, что магнитное поле и скорость частицы в синхрофазотроне однозначно связаны. Поэтому вместо того чтобы следить за значением скорости частицы, можно следить за значением изменяющегося во времени магнитного поля, и в соответствии с его значением изменять период ускоряющего поля.

Таким образом, если мы заставим период ускоряющего переменного электрического поля находиться в точном соответствии со значением магнитного поля, управляющего траекторией частиц, то можно осуществить резонансное ускорение на орбите с постоянным радиусом. В этом ускорителе, как и в других случаях, автофазировка обеспечивает возможность резонансного ускорения тех частиц, для которых условие резонанса выполняется нестрого. Радиус окружности, по которой движутся эти частицы, будет в синхрофазотроне, так же как и в других ускорителях, испытывать периодические колебания около радиуса траектории равновесных частиц.

Из сказанного выше видно, что синхрофазотрон оказывается гораздо более сложным для практического осуществления, чем фазотрон. В последнем период ускоряющего электрического поля может меняться по произвольному закону во времени, а в синхрофазотроне этого сделать нельзя. Если период ускоряющего поля будет немного отступать от того значения, которое требуется для выполнения условия движения по постоянной орбите [см. формулу (6)], то частицы быстро попадут на внутреннюю или наружную стенку вакуумной камеры. Это обусловлено тем, что отклонения периода от требуемого закона вызовут резкие изменения радиуса окружности, по которой будут двигаться частицы. Так как область пространства, в которой существует магнитное поле в синхрофазотроне, ограничена узкой дорожкой, то эти изменения радиуса движения частиц приведут к

тому, что частицы попадут на стенку камеры. Обычно в синхрофазотроне связь между значением периода и величиной магнитного поля поддерживается с точностью до 0,1%.

В настоящее время во всем мире работает несколько синхрофазотронов, дающих пучки протонов с очень большой энергией. Приведем коротко описание устройства этих ускорителей. Главной частью синхрофазотрона является кольцевой электромагнит. Иногда этот электромагнит подразделяется на четыре части, называемые квадрантами, которые разделяются прямолинейными промежутками. В этих прямолинейных промежутках размещается ускоряющая система, возбуждаемая генераторами переменного напряжения, период которого, как уже указано, меняется по закону, определяемому ростом магнитного поля в зазоре синхрофазотрона. В зазоре полюсов электромагнита помещается вакуумная камера, в которой поддерживается высокий вакуум — порядка 10^{-6} мм рт. ст.

Так же как и фазотрон, синхрофазотрон представляет собой импульсный ускоритель. Однако частота повторения импульсов в синхрофазотроне гораздо меньше, чем в фазотроне. Обычно процесс ускорения происходит секунду, две, в течение которых магнитное поле электромагнита возрастает от начальных значений до максимума. Наибольшее значение магнитного поля в синхрофазотронах обычно близко к 12—14 тыс. эрстед.

Протоны, ускоренные с помощью электростатического генератора или линейного ускорителя¹ до энергии в несколько миллионов электрон-вольт, через специальную инжектирующую систему «впрыскиваются» в вакуумную камеру синхрофазотрона. Впуск частиц в синхрофазотрон представляет очень трудную задачу. Требуется впустить

¹ Линейными ускорителями называют установки, в которых траектории ускоряемых частиц не являются окружностями, а близки к прямой линии. Ускорение частиц осуществляется резонансным методом с помощью переменного электрического поля, приложенного между многими полыми металлическими трубками. В настоящее время построено несколько таких установок, в которых протоны ускоряются до энергии 30 млн. электрон-вольт на длине около 12 м. Для работы подобных ускорителей также существенно явление автофазировки.

частицы внутрь камеры в нужный момент времени, когда магнитное поле синхрофазотрона достигнет такой величины, при которой впускаемые протоны будут двигаться по окружности, лежащей внутри камеры.

Кроме того, необходимо, чтобы частицы «впрыскивались» в камеру по точно определенному направлению. Здесь нужна очень большая точность, и если ее выразить в градусах, то она достигнет сотых долей градуса.

Одна из наибольших трудностей при создании синхрофазотронов состоит в необходимости очень тщательно выполнить магнитную систему и обеспечить большую азимутальную однородность магнитного поля на всем протяжении окружности большого радиуса, по которой движутся частицы в синхрофазотроне.

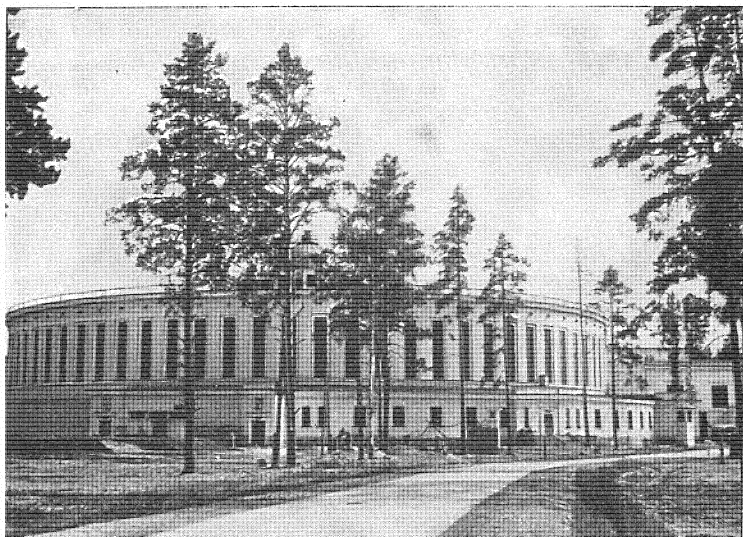
Расчет и опыты показывают, что при тех энергиях, при которых происходит выпуск частиц в синхрофазотрон, искажения магнитного поля, достигающие долей эрстеда, уже могут серьезно нарушить режим работы ускорителя. Это, впрочем, совершенно понятно. Так как ширина пространства, в котором движется частица в синхрофазотроне, очень мала по сравнению с радиусом окружности движения частицы, то достаточно даже очень малого искажения траектории с тем, чтобы частица в каком-то месте задела за наружную или внутреннюю стенку камеры. Устранение всевозможных возмущений, вызывающих искажение круговой траектории движения частиц в синхрофазотроне, является одной из основных трудностей, возникающих при создании этих приборов.

В настоящее время имеется уже несколько огромных ускорителей этого типа. В Бирмингеме, в Англии, имеется синхрофазотрон, дающий пучки протонов с энергией в 1 млрд. электрон-вольт. В США имеется два подобных ускорителя: один на энергию в 3 млрд. электрон-вольт, а другой на энергию в 6,2 млрд. электрон-вольт.

В Советском Союзе заканчивается сооружение синхрофазотрона Академии наук СССР, рассчитанного на получение пучка протонов с энергией в 10 млрд. электрон-вольт.

Мы уже говорили, что синхрофазотроны представляют собой гигантские сооружения. В качестве примера мы приводим данные о заканчивающемся сооружении синхрофазотрона Академии наук СССР. На фиг. 7 пока-

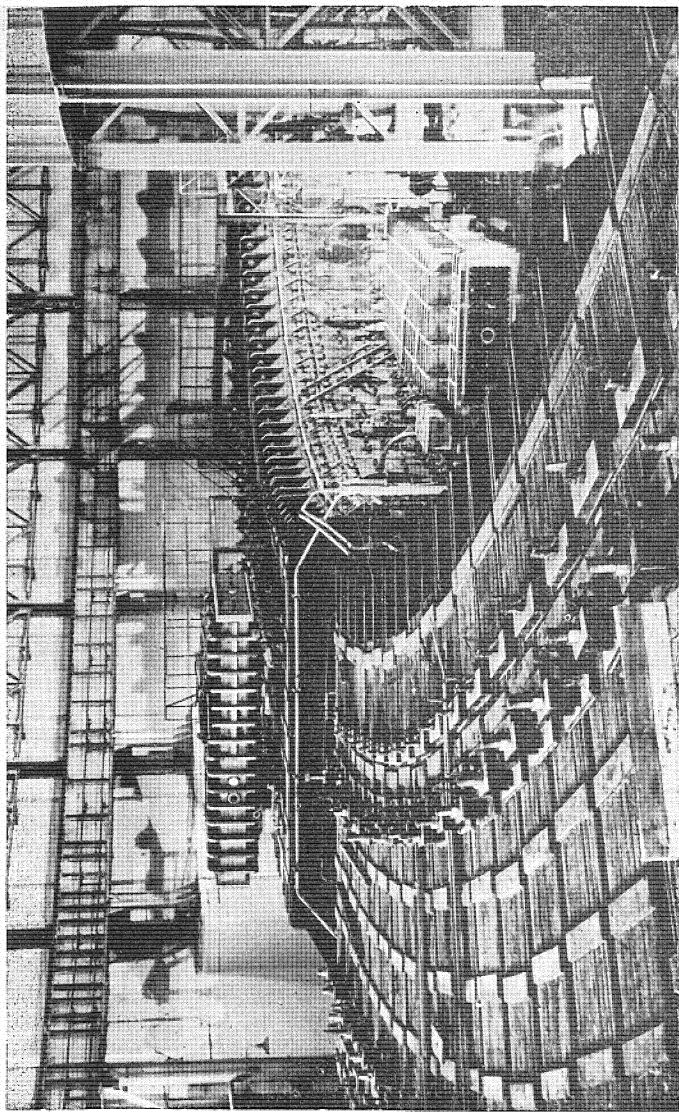
зано здание, где помещен сам ускоритель. Электромагнит ускорителя состоит из четырех квадрантов, общим весом вместе с обмоткой 36 000 т. Средний радиус окружности, по которой движутся частицы, 28 м. Прямолинейные промежутки между квадрантами достигают 8 м длины. В двух таких промежутках расположены электроды, уско-



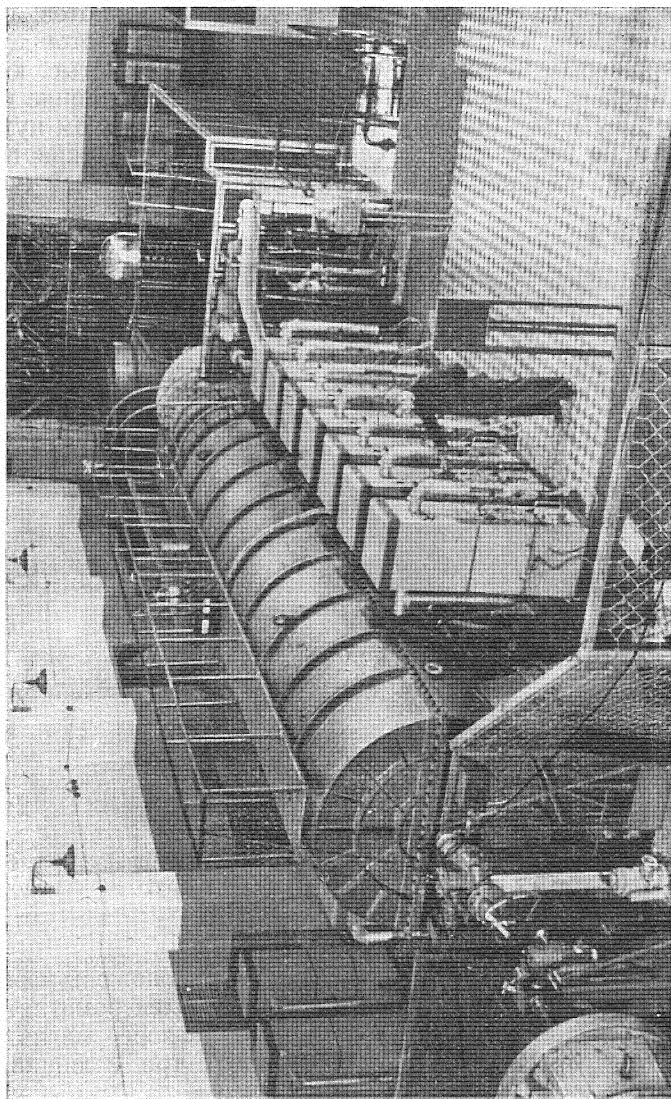
Фиг. 7. Общий вид здания, в котором помещен магнит синхрофазотрона АН СССР, рассчитанный на получение протонов с энергией 10 млрд. электрон-вольт

ряющие заряженные частицы, в третьем — вводная система, изображенная на фиг. 10, четвертый промежуток предназначен для вывода частиц.

Частицы, предварительно разогнанные до энергии в 9 млн. электрон-вольт в линейном ускорителе (см. фиг. 9), «впрыскиваются» в камеру синхрофазотрона по специальной вводной системе, состоящей из магнитных корректоров, поворотного магнита и магнитной линзы (см. фиг. 10). Ускоряющее частицы переменное электрическое напряжение включается в момент впуска частиц. Средняя энергия, приобретаемая частицей за один оборот, равна 2200 электрон-вольт.

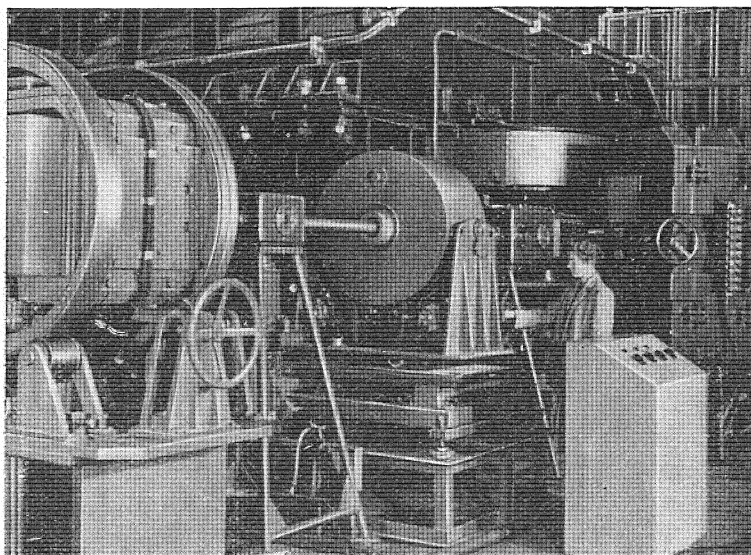


Фиг. 8. Часть магнита синхрофазотрона. Видны два квадранта, разделенные 8-метровым
прямолинейным промежутком



фиг. 9. Линейный ускоритель, в котором протоны, прежде чем попасть в синхрофазотрон, ускоряются до энергии 9 млн. электрон-вольт

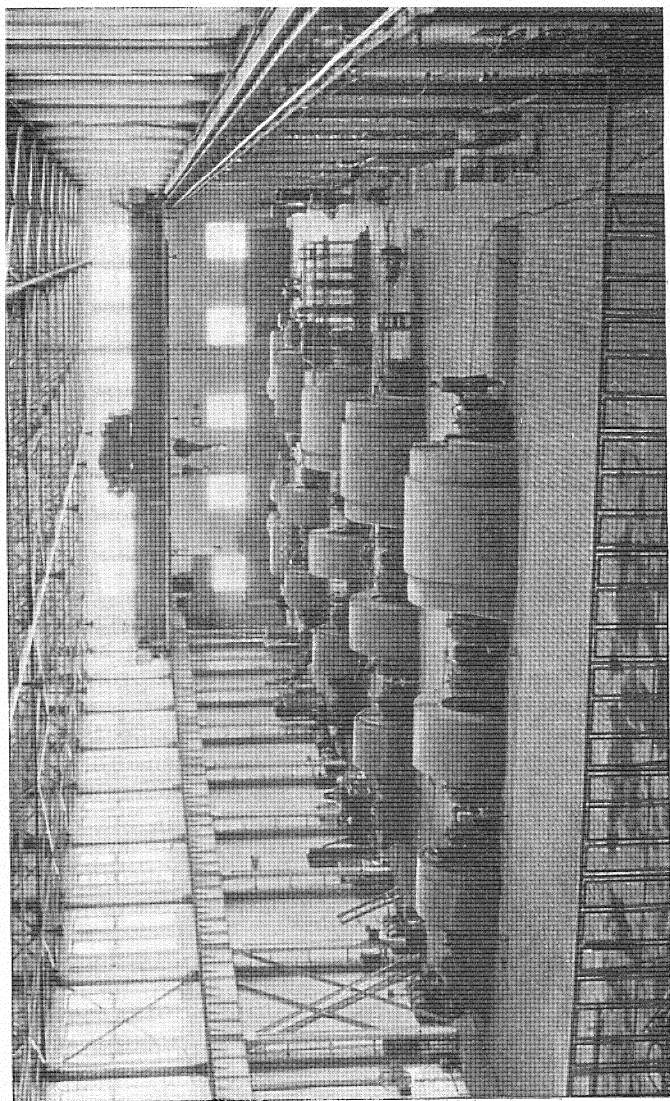
Легко подсчитать, что за время ускорения до максимальной энергии протон сделает 4,5 млн. оборотов по орбите длиной в 200 м. Общий путь, который протон будет проходить во время ускорения, равен 900 тыс. км, т. е. в два с лишним раза больше, чем расстояние от Земли до Луны. Для того чтобы на таком большом пути частицы не рассеялись, в камере должен поддерживаться вакуум порядка нескольких миллионных долей мм рт. ст.



Фиг. 10. Вводная система, по которой протоны из линейного ускорителя попадают в главную ускорительную камеру, помещенную в зазоре магнита

На фиг. 11 показан зал, в котором расположены электрические машины, питающие обмотку электромагнита синхрофазотрона. Магнитное поле в зазоре магнита возрастает от 150 до 13 000 эрстед за три с лишним секунды.

Реактивная мощность питания магнита равна 140 000 киловольт-ампер.



Фиг. 11. Генераторы, питающие магнит ускорителя. Общая реактивная мощность
140 000 киловольт-ампер

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

Мы рассказали читателю о мощных современных ускорителях, которые предназначены для ускорения тяжелых частиц: протонов и дейтронов. Однако много ценных сведений о природе атомного ядра и свойствах «элементарных» частиц материи было получено физиками при исследованиях, проводившихся с быстрыми электронами и γ -лучами.

В 1941 г. американскому исследователю Д. Керсту удалось построить ускоритель электронов, названный бетатроном и основанный на идее Р. Видероз. Ускорение электронов в бетатроне происходит за счет электродвижущей силы индукции, возникающей в переменном магнитном поле. Бетатрон работает по принципу трансформатора. Первичной обмоткой этого трансформатора является обмотка магнита, а вторичной — пучок электронов, вращающийся в магнитном поле по окружности с постоянным радиусом.

Таким образом, бетатрон является импульсным ускорителем и производит ускорение электронов в течение каждой четверти цикла переменного поля.

Хотя идея ускорения была сформулирована Р. Видероз еще в 1928 г., построить действующий ускоритель удалось только после того, как исследователи выяснили условия устойчивости движения, о которых говорилось выше, при анализе работы циклотрона.

Существенный вклад в теорию этого вопроса внесли работы Д. Керста, Р. Сербера и Я. П. Терлецкого.

Мы не будем останавливаться на изложении принципов работы и устройства бетатронов, так как эти ускорители в настоящее время хорошо известны и широко используются как для просвечивания металлических изделий большой толщины, так и для биологических и медицинских исследований.

Бетатрон является очень эффективным ускорителем для получения электронов с относительно небольшой энергией — 20—50 млн. электрон-вольт.

Сначала казалось, что с помощью бетатронов можно почти неограниченно увеличивать энергию электронов. Приращение массы электронов со скоростью, столь вредное для работы циклотрона, не мешает ускорению элек-

тронов в бетатроне. Однако советскими физиками Д. Д. Иваненко и И. Я. Померанчуком, И. Я. Померанчуком и Л. А. Арцимовичем было установлено, что в действительности верхний предел энергии электронов, которые могут быть ускорены в бетатроне, близок к 300—400 млн. электрон-вольт.

Причина этого заключается в том, что всякий раз, когда электроны движутся с ускорением, они испускают электромагнитные волны. Это явление всем хорошо известно, и на нем фактически основана вся радиотехника. Но в том случае, когда электроны двигаются в бетатроне, они тоже испытывают ускорение. Это ускорение обусловлено центростремительной силой Лоренца, изменяющей направление скорости электронов и заставляющей их вращаться по окружности. Следовательно, и в бетатроне должно возникнуть электромагнитное излучение.

Потеря энергии, испытываемая электронами за счет этого излучения, очень быстро (пропорционально четвертой степени) возрастает с ростом энергии электронов. Поэтому уже при энергиях в несколько сот миллионов электрон-вольт заметная доля энергии, полученной электроном от вихревого поля, которое ускоряет электроны в бетатроне, тратится на электромагнитное излучение. В результате этого электроны начинают двигаться не по круговой, а по спиральной траектории, все больше и больше скручивающейся внутрь, и в конце концов попадают на внутреннюю стенку вакуумной камеры.

Это обстоятельство приводит к резкому ограничению верхнего предела энергии частиц в бетатроне.

СИНХРОТРОН

В 1946—1947 гг. в ряде стран почти одновременно были построены и начали давать пучки быстрых электронов новые ускорители — синхротроны. Синхротрон является резонансным ускорителем, в котором магнитное поле, заставляющее электроны двигаться по окружности, возрастает во времени. В этом отношении синхротрон подобен бетатрону. Однако ускорение частиц осуществляется в синхротроне переменным электрическим полем с постоянной частотой. Механизм ускорения в этом случае обеспечивается, как мы уже показали, автотазировкой.

Необходимо отметить важное конструктивное преимущество синхротрона. Известно, что в природе не существует скоростей, больших скорости света. Электроны, ускоренные до энергии 2—3 млн. электрон-вольт, уже обладают скоростями, практически равными скорости света. Поэтому при дальнейшем увеличении их энергии скорость электронов уже не меняется. Так как период обращения T есть отношение длины окружности к скорости электрона, то постоянство периода обращения при постоянстве скорости означает, что радиус круговой траектории, по которой движется электрон в синхротроне, будет постоянным в течение всего процесса ускорения. Это позволяет выполнить полюса электромагнита синхротрона в виде узкого кольца, ширина которого много меньше радиуса кольца. Понятно, что такая конструкция позволяет существенно облегчить вес и, что особенно важно, уменьшить мощность, необходимую для питания электромагнита ускорителя.

В результате делается практически возможным создание ускорителей электронов, рассчитанных на получение гораздо больших энергий, чем достигнутые в бетатроне.

Однако дело не только в конструктивных и экономических преимуществах синхротрона. Этот ускоритель обладает также важным принципиальным преимуществом. Мы уже указывали, что при движении электрона большой энергии в магнитном поле он теряет энергию, испуская электромагнитное излучение. В бетатроне это явление нарушает механизм ускорения.

Как же обстоит дело в синхротроне?

Конечно, излучение возникает и в синхротроне. Однако здесь этот эффект не мешает ускорению частиц. Энергия, теряемая электроном на излучение, автоматически восполняется переменным электрическим полем, резонансно ускоряющим электроны.

Наличие излучения в синхротроне приводит только к тому, что разность потенциалов, ускоряющая частицы, должна увеличиваться, если мы хотим ускорять электроны до больших энергий.

Чтобы читателю стало ясно, о каких величинах идет речь, приведем следующие данные. В ускорителе на энергию 300 мэв, при радиусе орбиты 1 м, электрон те-

ряёт на электромагнитное излучение за один оборот энергию, равную приблизительно 1000 электрон-вольт. В бетатроне такую потерю энергии уже очень трудно скомпенсировать. При энергии в 1 млрд. электрон-вольт и радиусе орбиты 4,5 м потеря энергии уже составляет около 20 000 электрон-вольт. Если бы мы построили синхротрон на 10 млрд. электрон-вольт, с радиусом орбиты 20 м, то потеря энергии за один оборот составляла бы около 30 млн. электрон-вольт.

В настоящее время уже построены синхротроны, способные ускорять электроны до энергии в 1 млрд. электрон-вольт. Повидимому, можно построить синхротроны на энергию, в 5—10 раз бóльшую.

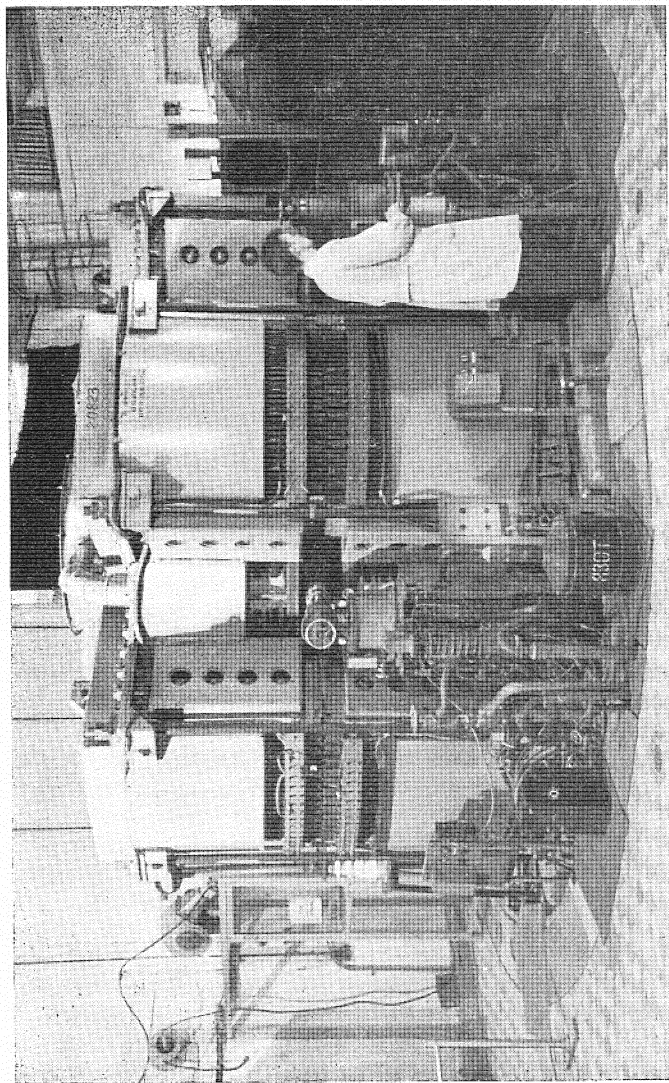
Опишем теперь коротко устройство синхротрона. Магнит синхротрона представляет собой С-образную или многояремную конструкцию с полюсами, выполненными в виде кольцевой дорожки, малой по сравнению с радиусом ширины. Ярма магнитов находятся с наружной стороны.

На фиг. 12 показан шестияремный магнит синхротрона Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР, рассчитанного на получение электронов с энергией до 265 мэв.

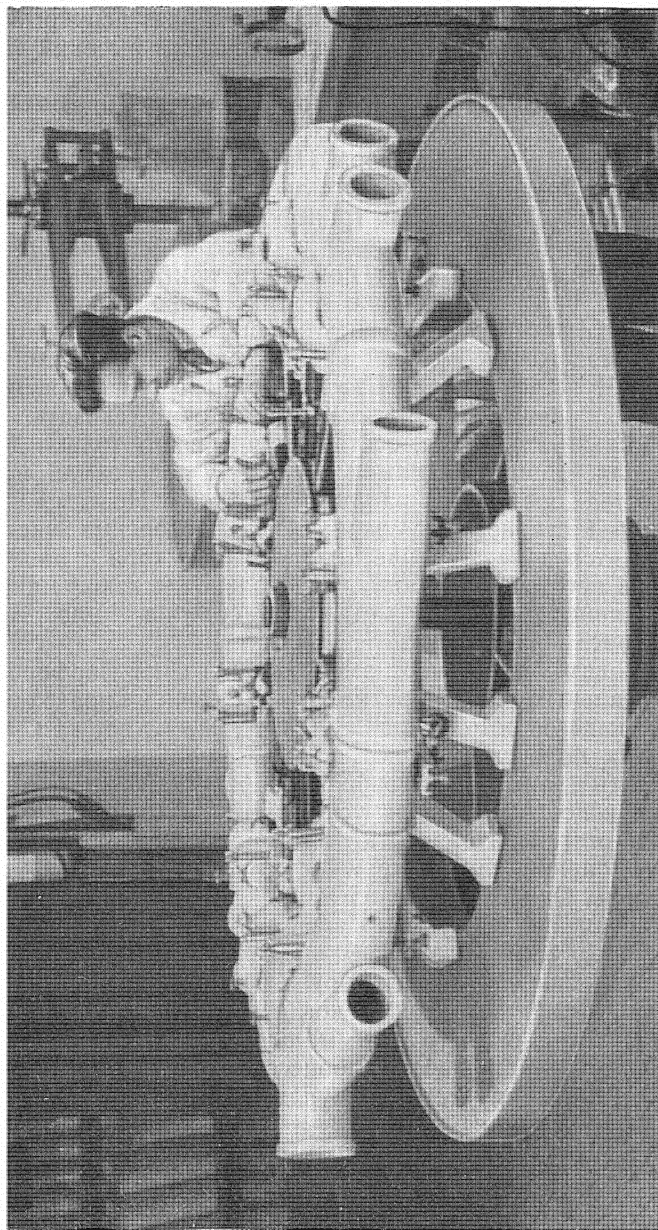
Обычно в синхротроне начальная часть ускорения осуществляется с помощью бетатронного режима. Для этого используется небольшой сердечник, обеспечивающий ускорение частиц вихревым полем до энергии в 2—3 млн. электрон-вольт. Затем сердечник насыщается, и дальнейшее ускорение электронов осуществляется с помощью переменного электрического поля, возбуждаемого в так называемом резонаторе, расположенном на пути частиц.

Так же как и в других ускорителях, в синхротроне движение частиц происходит внутри вакуумной камеры. Камера синхротрона имеет форму полого тороида и выполняется обычно из фарфора или кварца.

На фиг. 13 изображена фарфоровая камера синхротрона, находящаяся на монтажном столе. Многочисленные патрубки служат для ввода в камеру инжектора электронов, т. е. электронной пушки (см. ниже), мишени, о которую ударяются электроны в конце процесса ускорения, и для вывода пучка γ -лучей, образующихся в результате соударения электронов с мишенью.



Фиг. 12. Шестиполюсный магнит синхротрона Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР, рассчитанный на получение электронов с энергией 265 млн. электрон-вольт



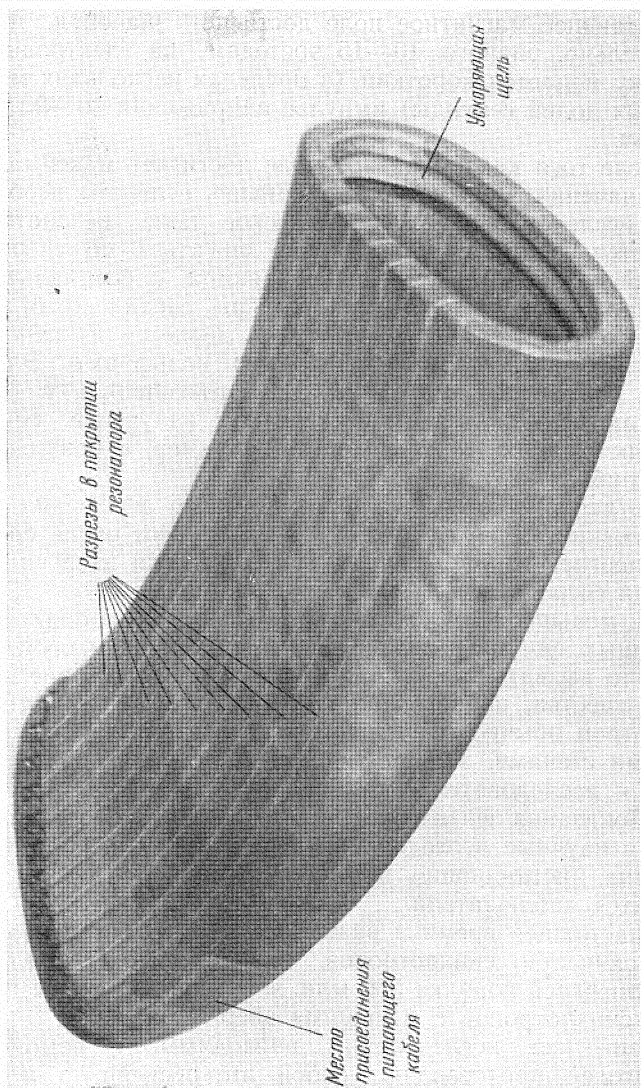
Фиг. 13. Камера синхротрона на монтажном столе

Через один или два патрубка производят непрерывную откачку камеры. В камере поддерживается высокий вакуум — в пределах 10^{-6} мм рт. ст. Так как для питания магнитов синхротронов обычно используют нормальный 50-периодный ток, камеру синхротрона приходится делать не из металла, а из фарфора. При этом приходится набирать электромагнит из тонких листов железа так же, как это делается для силовых трансформаторов.

В зазор электромагнита с быстро изменяющимся магнитным полем нельзя помещать каких-либо проводников. В противном случае в этих проводниках возникают токи Фуко, сильно искажающие магнитное поле, что сейчас же приводит к прекращению работы синхротрона. Чувствительность этого прибора к искажениям поля исключительно велика. Достаточно сказать, что ничтожные искажения, составляющие всего только десятые доли эрстеда и равные магнитному полю земли, могут полностью прекратить работу ускорителя. Поэтому и резонатор (устройство, служащее для ускорения частиц) приходится делать в виде кварцевого сектора с нанесенным на него очень тонким, в несколько десятков микрон, проводящим слоем металла, серебра или меди (см. фиг. 14).

Резонатор клеивают вместо одного из фарфоровых тороидальных секторов камеры. Обычно поверхность ускоряющего резонатора подразделяется на ряд продольных полосок, которые препятствуют возникновению замкнутых вихревых токов (см. фиг. 14). Полый резонатор, используемый для ускорения электронов, возбуждается от генератора электромагнитных волн, с длиной волны, равной длине окружности, по которой вращается электрон. Около одного из концов резонатора, в ускоряющей щели, возбуждается высокочастотное электрическое поле, ускоряющее частицы при каждом их обороте. Процесс ускорения электронов в синхротроне происходит в течение той части цикла, когда магнитное поле в зазоре нарастает. Обычно максимальное поле в зазоре — порядка 10 000 эрстед. Весь процесс ускорения длится приблизительно одну сотую секунды.

Инжектируются частицы в синхротрон с помощью обычной электронной пушечки, очень похожей на те, которые используются в рентгеновских трубках или телеви-



Фиг. 14. Резонатор — ускоряющий электрод синхротрона

зорах. Пушечка располагается внутри вакуумной камеры, вблизи ее наружной стенки. В тот момент, когда возрастающее магнитное поле достигнет значения, приблизительно равного 10—15 эрстедам, на электронную пушечку подается короткий (в пределах нескольких миллионных долей секунды) импульс напряжения 40—80 киловольт.

После того как магнитное поле достигнет максимального значения (или несколько раньше, если это необходимо исследователю), электрическое поле резонатора снимается и электроны начинают двигаться по свертывающейся спирали, пока не ударяются о специальную мишень, помещенную внутри камеры, недалеко от ее внутренней стенки. Обычно мишень делается из какого-либо тяжелого материала, например вольфрама. Электроны, ударившись о мишень и затормозившись в ней, испускают жесткое электромагнитное излучение (γ -лучи), так же как это происходит, например, в рентгеновских трубках.

В отличие от обычного рентгеновского излучения, γ -лучи, возникающие в синхротроне, обладают очень большой энергией и направленностью. Почти вся энергия излучения сосредоточена в конусе с раствором около 1,5—2° или меньше. Интенсивность излучения в мощных современных синхротронах очень велика. Это излучение способно вызвать тяжелые ожоги и даже поражение живого существа, попавшего под пучок γ -лучей. Поэтому синхротрон обычно размещается в зале с толстыми бетонными стенами, защищающими обслуживающий персонал и исследователей от вредного действия γ -излучения. Показания физических приборов, с которыми проводятся научные исследования на пучке γ -лучей, от синхротрона дистанционно передаются в лаборатории, где находятся наблюдатели.

В настоящее время в разных странах работает большое количество синхротронов, дающих пучки электронов с энергией порядка 300 млн. электрон-вольт, а также много синхротронов с меньшими энергиями.

Физические исследования, проводимые с помощью ускорителей, представляют собой интереснейшую и обширную область, о которой мы здесь, конечно, не можем говорить подробно.

Среди наиболее важных научных результатов, полученных с помощью синхротронов, следует указать обнаружение сильного взаимодействия электромагнитного излучения с π -мезонами, заряженными и нейтральными, установление свойств этих частиц, их связи с нуклонами и целого ряда важных характеристик атомного ядра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассказали читателю почти обо всех основных ускорителях, широко применяемых в настоящее время учеными. Нам пришлось по необходимости дать только очень беглое описание принципов действия этих приборов и их устройства. Некоторые из них были только упомянуты. Подробнее мы говорили о тех ускорителях, использование которых уже внесло решающий вклад в изучение природы ядерных сил и вопросов, касающихся свойств так называемых элементарных частиц.

Существует еще несколько ускорителей, которые, по-видимому, в будущем также будут широко использоваться физиками. Мы имеем в виду линейные резонансные ускорители заряженных частиц. Уже в настоящее время с помощью линейных ускорителей получены пучки электронов с энергией 600 млн. электрон-вольт. Линейные ускорители электронов до энергии 15 мэв начинают использоваться в промышленности и медицине.

Протонные линейные ускорители только развиваются, и в настоящее время еще нет сколько-нибудь крупных протонных ускорителей.

Мы совсем не касались перспектив развития физики и техники ускорителей. А между тем в этой интереснейшей области идет бурный процесс развития. Кто-то из физиков подсчитал, что в среднем за каждые шесть лет предельная энергия частиц, которую удается получить с помощью ускорителей, возрастает в десять раз. Каковы же наши непосредственные перспективы на ближайшие годы? Для того чтобы повышать энергию частиц, используя магнитные поля и заставляя частицы двигаться по круговым траекториям, необходимо либо увеличивать напряженность магнитного поля (а это мы пока не умеем сделать), либо радиус электромагнита ускорителя и,

следовательно, увеличить его размеры, вес, стоимость и мощность потребляемой им энергии. Однако читатель уже видел, какие гигантские сооружения представляют собой современные синхрофазотроны. Естественно поэтому, что в течение ряда последних лет внимание физиков привлекал вопрос, нельзя ли добиться того, чтобы облегчить вес электромагнитов синхрофазотронов.

Решение задачи удалось найти группе американских физиков — Ливингстону, Куранту и Снайдеру. Они обратили внимание на тот факт, что огромный вес синхрофазотронов почти целиком обусловлен большой шириной кольцевой дорожки зазора электромагнита этих ускорителей. Конечно, нельзя просто так, ничего не меняя в условиях движения частиц, уменьшить ширину этой дорожки. Дело в том, что магнитные силы, обеспечивающие устойчивость движения в современных ускорителях, в сущности являются очень слабыми. В силу этого частицы, почему-либо отклонившиеся от равновесной траектории, испытывают колебания вокруг этой траектории, причем размах, или, как говорят, амплитуда, этих колебаний относительно велик. Поэтому приходится делать «дорожку» тоже достаточно большой. Спрашивается, нельзя ли сделать так, чтобы резко уменьшить размах колебаний частиц? Это позволило бы уменьшить ширину кольцевой дорожки и дало бы возможность строить синхрофазотроны на еще бóльшую энергию.

Оказывается, что это сделать можно, но естественно, что для этого необходимо резко увеличить магнитные силы, «привязывающие» частицы к орбите. Способ решения этой задачи получил название «жесткой» фокусировки. «Жесткая» фокусировка позволяет в 10—20 раз уменьшить ширину дорожки. Поэтому в настоящее время во многих странах мира проектируются синхрофазотроны с жесткой фокусировкой. В Советском Союзе под руководством Владимирского также ведется проектирование сильнофокусирующего ускорителя на большую энергию.

Следующий шаг в этом же направлении был сделан в Советском Союзе Петуховым, Рабиновичем и Коломенским, предложившими в 1953 году интересную модификацию метода жесткой фокусировки. Они предложили использовать для электромагнита синхрофазотрона постоянное, а не переменное магнитное поле. Несмотря на

некоторые трудности, эта идея сулит большие преимущества. Недавно аналогичное предложение выдвинуто американскими физиками Симоном и Керстом. Несомненно, ближайшие годы принесут нам много интересного в этой области.

В настоящее время уже ясно, что дальнейшие успехи науки, касающиеся природы ядерных сил, практически целиком зависят от уровня развития техники ускорителей.

Не приходится сомневаться, что скоро появятся и новые идеи, которые позволят еще глубже и более экономично решать интереснейшие задачи современной физики и еще лучше познать природу материи.

С о д е р ж а н и е

Введение	3
Движение заряженной частицы в магнитном поле	7
Циклотрон	8
Как увеличить предел достижимых энергий	13
Принцип автофазировки	16
Фазотрон	21
Синхрофазотрон	26
Ускорители электронов	36
Синхротрон	37
Заключение	45

Печатается по постановлению Президиума Академии наук СССР

Редактор издательства *М. С. Рабинович* Технический редактор *Е. В. Макуни*.

Сдано в набор 30/І 1956 г. Подп. в печать 14/ІІ 1956 г. Формат бум. 84×108^{1/32}•
Печ. л. 3=2,46. Уч.-изд. лист. 2,4. Тираж 10000. Т-01479. Изд. № 1700. Тип. зак. 102.
Цена 70 коп.

Издательство Академии наук СССР. Б-64, Москва, Подсосенский пер., л. 21

2-я типография Издательства АН СССР. Москва, Г-99, Шушинский пер., л. 10

Цена 70 коп.