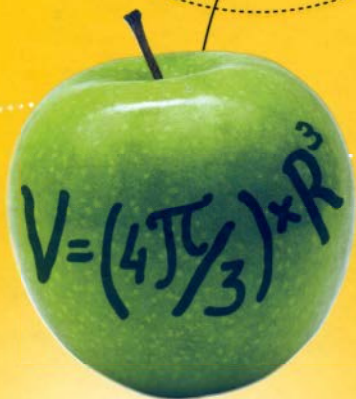


#PopScience

Лоуренс КРАУСС

СТРАХ ФИЗИКИ

Сферический
конь в вакууме



FEAR of PHYSICS

A GUIDE for the PERPLEXED

Lawrence M. Krauss

BASIC



BOOKS

A Member of the Perseus Books Group
New York

Лоуренс КРАУСС

СТРАХ ФИЗИКИ

Сферический
конь в вакууме

 ПИТЕР®

Москва · Санкт-Петербург · Нижний Новгород · Воронеж
Киев · Екатеринбург · Самара · Минск

2016

Лоуренс Краусс

Страх физики. Сферический конь в вакууме

Серия «Pop Science»

Перевел с английского А. Пасечник

Заведующая редакцией	<i>Ю. Сергиенко</i>
Ведущий редактор	<i>Н. Римицан</i>
Художник	<i>С. Заматевская</i>
Корректоры	<i>С. Беляева, Н. Баталова</i>
Верстка	<i>Л. Соловьева</i>

ББК 22.3

УДК 53

Краусс Лоуренс

K78 Страх физики. Сферический конь в вакууме. — СПб.: Питер, 2016. — 288 с.: ил. — (Серия «Pop Science»).

ISBN 978-5-496-02066-4

Легендарная книга Лоуренса Краусса переведена на 12 языков мира и написана для людей, мало или совсем не знакомых с физикой, чтобы они смогли победить свой страх перед этой наукой. «Страх физики» — живой, непосредственный, непочтительный и увлекательный рассказ обо всем, от кипения воды до основ существования Вселенной. Книга наполнена забавными историями и наглядными примерами, позволяющими разобраться в самых сложных хитросплетениях современных научных теорий.

12+ (В соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2010 г. № 436-ФЗ.)

ISBN 978-0465002184 англ.
ISBN 978-5-496-02066-4

Copyright 2007 by Basic Books
© Перевод на русский язык ООО Издательство «Питер», 2016
© Издание на русском языке, оформление ООО Издательство «Питер», 2016
© Серия «Pop Science», 2016

Права на издание получены по соглашению с BasicBooks. Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ООО «Питер Пресс», 192102, Санкт-Петербург, ул. Андреевская (д. Волкова), 3, литер А, пом. 7Н.

Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции ОК 034-2014, 58.11.12.000 —
Книги печатные профессиональные, технические и научные.

Подписано в печать 20.01.16. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Усл. п. л. 18,000.

Тираж 3500. ЗаказМ-49.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного электронного оригинал-макета
в типографии филиала АО «ТАТМЕДИА» «ПИК «Идел-Пресс».
420066, Казань, ул. Декабристов, 2. E-mail: idelpress@mail.ru

Оглавление

Предисловие к новому изданию	6
Предисловие.....	8
Часть первая. Процесс	13
Глава 1. Ищите там, где светло.....	14
Глава 2. Искусство чисел.....	50
Часть вторая. Прогресс	87
Глава 3. Творческий плагиат.....	88
Глава 4. Скрытая реальность	148
Часть третья. Принципы	203
Глава 5. В поисках симметрии.....	204
Глава 6. Это не закончится, пока не завершится.....	258
Благодарности	286

Предисловие к новому изданию

Я очень разволновался, когда мои редакторы из Basic Books спросили, не заинтересован ли я в обновлении и переиздании «Страха физики». За пятнадцать лет, прошедших с момента выхода первого издания, в мире физики произошли огромные изменения, затронувшие даже некоторые из наших руководящих принципов. Кроме того, изменился и мой собственный взгляд на то, какие вопросы являются важными, особенно в отношении общественного интереса к науке, поскольку за эти годы я сам эволюционировал не только как ученый, но и как писатель.

В то же время, около десяти лет назад, читая серию лекций для школьных учителей физики, я с удивлением узнал, что моя книга стала чем-то вроде «культовой классики» в учебном процессе и ее часто рекомендовали перспективным ученикам для ознакомления с состоянием дел в современной физике. Один клуб любителей физики даже прислал мне футболку с изображением сферического коня. Таким образом, несмотря на тот факт, что изначально книга рассчитывалась на людей, мало знакомых или вообще незна-

комых с физикой, и преследовала цель развеять их страх перед этой наукой, она оказалась востребована значительно более широкой аудиторией. Я понял, что должен больше рассказать о том, что происходит сегодня на переднем рубеже науки, чтобы увлечь ею интересующихся физикой молодых людей.

С этими мыслями я переписал книгу от начала до конца, стараясь оставаться в рамках первоначальной структуры, но добавив новый материал. Я постарался сделать изложение более понятным для одних и более увлекательным для других, стремясь отразить меняющийся характер современной науки, которая уже пытается выглянуть за пределы нашей Вселенной. Я надеюсь, что вы испытаете от чтения этой книги не меньшее удовольствие, чем то, которое я получил от ее обновления.

Лоуренс М. Краусс,
Кливленд, Огайо, ноябрь 2006

Предисловие

Когда кто-то на вечеринке узнает, что я физик, он либо немедленно меняет тему разговора, либо начинает расспрашивать меня о Большом взрыве, других вселенных, сверхсветовых двигателях, кварках, сверхпроводниках, суперструнах или суперколлайдерах. Даже те, кто честно признавались в том, что не любили физику в школе и никогда об этом не жалели, часто слушали рассказы о мистических явлениях, происходящих на переднем крае науки, как завороченные. Современная физика занимается решением многих космических проблем, о которых так или иначе размышляет любой человек. Однако часто физика представляется людям сложной, недоступной для понимания магией, открытой лишь посвященным, поскольку многие исследования лежат в областях, страшно далеких от их житейского опыта.

Но существует и более серьезное препятствие, мешающее многим понять, чем занимается современная физика. Физический подход к решению задач и используемый физиками язык не употребляются большинством людей в повседневной жизни. Для наблюдателей, лишенных присущего физикам особого взгляда на мир, разношерстный зоопарк физических явлений выглядит непонятным, а зачастую и пугающим.

Для того чтобы представить читателю современную физику в моем понимании, я решил не сосредоточиваться на описании конкретных физических теорий, а рассказать об инструментах, используемых физиками в их работе. Если кто-то захочет оценить сегодняшнее состояние физической науки как с точки зрения интеллектуальной деятельности человека, так и с точки зрения ее роли в формировании нашей современной картины мира, то это гораздо проще сделать, имея некоторый начальный бэкграунд, дающий понимание того, как вся эта наука работает. Настоящая книга является не столько учебником по выживанию в джунглях, сколько руководством о том, что необходимо взять с собой в туристический поход, как обойти опасные скалы, где полюбоваться прекрасным видом и как безопасно вернуться домой.

Сами же физики способны продолжать современные исследования только потому, что они, главным образом, руководствуются теми же несколькими фундаментальными принципами, которые мы используем для изучения повседневной жизни. Физическая теория в настоящее время занимается явлениями, происходящими на пространственно-временных масштабах, различающихся более чем на шестьдесят порядков — это означает, что отношение размеров самых крупных изучаемых физиками объектов к самым мелким выражается числом, состоящим из единицы и 60 нулей. Экспериментальные исследования, правда, распространяются на несколько меньший диапазон масштабов. Тем не менее на фоне всего этого зоопарка описание любого явления, сделанное одним физиком, обычно понятно другому, потому что при этом используется не более дюжины основных понятий. Никакая другая область человеческого знания не является настолько обширной и одновременно настолько легко формализуемой.

Отчасти по этой причине моя книга такая тонкая. Инструменты, которыми пользуются физики, малочисленны, и хотя для освоения их в совершенстве необходима ученая степень, для того чтобы просто понять, как они работают, не нужен увесистый фолиант. В каждой из шести глав (разумеется, если вы купите эту книгу) вы найдете обсуждение одной из ключевых идей, направляющих физиков в их научном поиске. Чтобы проиллюстрировать эти идеи, я подобрал примеры, в каждом из которых я, подобно музыканту, играющему гамму, поднимаюсь от основ до вершин. Подбор примеров может показаться эклектичным, но, концентрируясь в начале главы на том, где мы находимся, я стараюсь в конце привести читателя к пониманию того, куда мы идем.

Кроме того, по этой причине я взял на себя смелость представить наиболее современные концепции. Некоторые читатели с облегчением вздохнут, встретив знакомые идеи, хотя кому-то они могут показаться не вполне понятными. Некоторые из представленных концепций, являясь фундаментальными, в то же время никогда ранее не были представлены в популярной литературе. Но это не важно. Я не собираюсь тестировать на вас новые дидактические методики. Мне хотелось бы дать читателю ощутить скорее вкус физики, нежели ее содержание. Я думаю, что для не-ученых понимание физики важнее, чем знание каких-то конкретных ее приложений.

Самое главное, что в физике существуют замечательные связи между отдельными фрагментами картины мира, лежащие под поверхностью живописного полотна. Именно эти связи образуют ткань физики. Нет большей радости для ученого, чем обнаружить очередную такую связь и проверить ее экспериментально. В конце концов это и делает физику наукой, и, если вы заинтересуетесь ею всерьез, перед вами откроются поистине безграничные перспективы.

Наконец, я хочу подчеркнуть, что физика — это такая же творческая интеллектуальная деятельность человека, как искусство и музыка. Физика формирует наш культурный опыт. Не берусь судить, что из современного культурного наследия будет более всего востребовано грядущими поколениями, но уверен, что игнорирование культурного аспекта нашей научной традиции было бы серьезной ошибкой. В конце концов именно наука формирует наше представление об окружающем мире и о нашем месте в нем. Научная безграмотность сегодня тождественна бескультурью. А главная добродетель культурной деятельности — будь то искусство, музыка, литература или науки — это обогащение нашей жизни. Через культуру мы испытываем радость, волнение, воспринимаем красоту, приобщаемся к тайнам мироздания. Единственное, что, на мой взгляд, действительно отличает науку от других вещей в этом списке, это более высокий уровень образования, необходимый для того, чтобы получать от нее удовольствие. Для большинства физиков главным личным оправданием их деятельности является именно получение удовольствия, радости от открытия новых закономерностей и ощущение красоты, проявляющейся в сочетании разнообразия явлений физического мира и простоты лежащих в его основании законов. Так что, с позволения Эрики Йонг¹, эта книга посвящена вопросу: способен ли обычный человек, преодолев предубеждения, получить истинное удовольствие от физики? Надеюсь, что да.

¹ Эрика Йонг — американская писательница, автор книги «Страх полета» (Fear of Flying). — *Примеч. пер.*

Самая большая тайна любого путешествия заключается в том, как путешественник попал в начальную точку своего путешествия.

*Луиза Боган,
Путешествие вокруг комнаты*



ЧАСТЬ ПЕРВАЯ
.....
ПРОЦЕСС

Глава 1

ИЩИТЕ ТАМ, ГДЕ СВЕТЛО

Если единственный инструмент, который у вас есть, это молоток, то вы невольно начинаете рассматривать все окружающие предметы как гвозди.

Однажды некий миллиардер пригласил биолога, математика и физика и дал им задание за год разработать методику определения победителя на скачках, пообещав за успешное решение задачи миллион долларов.

Первым принес результаты своих изысканий биолог:

— Мне необходимо знать полную родословную лошади, успехи ее родителей, рацион питания, перенесенные заболевания, и тогда я смогу точно назвать максимальную скорость, которую она способна развить на ипподроме.

Следующим пришел математик:

— Имея точные статистические данные предыдущих забегов этих лошадей, я могу вычислить матожидание результата любого последующего.

Так и не дождавшись результатов физика, миллиардер решил позвонить ему сам.

— Задача пока далека от окончательного решения, — ответил физик, — мне необходимо еще десять лет, пятьдесят миллионов долларов, команда аспирантов и экспериментальная лаборатория. Но я уже построил модель движения сферического коня в вакууме...

Этот бородатый анекдот если и не смешной, то прекрасно иллюстрирующий, как большинство физиков представляют себе — метафорически — картину мира. Набор инструментов, при помощи которых физикам приходится описывать природу, ограничен.

Большинство современных теорий, о которых вы, вероятно, читали, начинали свою жизнь в виде простых моделей, придуманных учеными, размышлявшими, как еще можно решить стоящую перед ними задачу. Эти простые модели были основаны на еще более простых моделях, которые, в свою очередь, базировались на еще более простых, и так далее, поскольку количество классов уравнений, имеющих точное решение, можно сосчитать по пальцам одной, ну хорошо — двух рук. Большинство физиков следуют тому же правилу, которое позволяет голливудским продюсерам приумножать свои капиталы: эксплуатируйте это, пока оно работает, а потом сделайте ремейк и эксплуатируйте дальше.

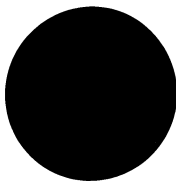
Анекдот про сферического коня в вакууме мне нравится еще и тем, что он отражает один очень важный императив работы ученого, которому обычно редко уделяется внимание в научно-популярной литературе: *прежде чем начинать*

заниматься какой-то проблемой, необходимо абстрагироваться от всех несущественных деталей!

В приведенном императиве — два оператива: абстрагирование и удаление несущественных деталей. Отделение существенных деталей от несущественных является первым шагом в построении любой модели, и каждый из нас *подсознательно* занимается этим в обычной жизни с момента рождения. Ученые отличаются от обычных людей тем, что делают это *сознательно*. Преодоление естественного желания не отбрасывать несущественную информацию, вероятно, наиболее важный и сложный аспект изучения физики. К тому же то, что является несущественным в одной ситуации, может оказаться очень даже существенным в другой — все зависит от того, что в данный момент интересует ученого. И это приводит нас ко второй составляющей императива: абстракции.

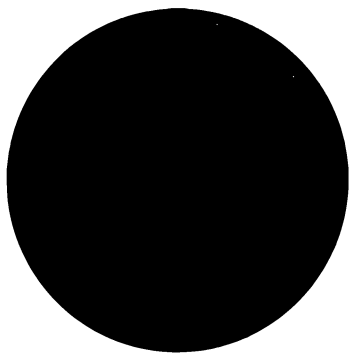
Из всех вариантов абстрактного мышления наиболее сложным в физике является выбор способа подступиться к проблеме. Даже для простого описания равномерного прямолинейного движения — первого крупного прорыва в физике — требуется настолько сильно абстрагироваться от повседневного житейского опыта, что многие великие мыслители прошлого не сумели прийти к этому, казалось бы, простому результату, впервые полученному только Галилеем. Но об этом я расскажу позже, а сейчас вернемся к нашим коням.

Представьте себе, что это конь:

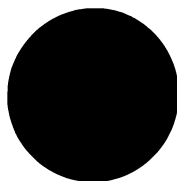


Сферический конь

Теперь представьте себе суперконя, во всем идентичного обычному коню, но имеющего вдвое больший диаметр:



Суперконь



Обычный конь

Чем отличаются эти кони? Можем ли мы сказать, что суперконь вдвое больше обычного коня? Суперконь имеет вдвое больший диаметр, значит ли это, что он сам вдвое больше? Например, во сколько раз вес суперконя превосходит вес обычного коня? Если оба коня сделаны из одного и того же материала, то логично предположить, что их вес будет пропорционален количеству материала, пошедшему на их изготовление. А количество материала пропорционально *объему* коня. Для тел сложной формы определить объем зачастую затруднительно, но для сферы это простая школьная задача. Возможно, вы еще не забыли формулу объема шара: $V = (4\pi/3) r^3$. Но мы не знаем точного значения объема каждого из коней, мы можем вычислить только их отношение. Объем обычно измеряется в кубических метрах, кубических сантиметрах, кубических километрах, даже в кубических футах или дюймах — для нас не так важны сами единицы измерения, как то, что

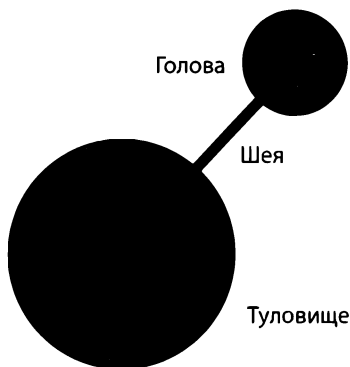
они — *кубические*. Это означает, что объем пропорционален кубу линейного размера. Если диаметр шара увеличить в 2 раза, его объем увеличится в $2 \times 2 \times 2 = 8$ раз. Значит, суперконь должен весить в 8 раз больше, чем обычный конь. А что, если мы захотим сшить для коня пальто? Насколько больше материала потребуется на пальто для суперконя, чем на пальто для обычного коня? Количество материала должно быть пропорционально площади поверхности коня. Если диаметр коня увеличивается в 2 раза, то площадь, измеряемая в *квадратных* метрах, километрах, сантиметрах, футах, дюймах, — увеличится пропорционально *квадрату* линейного размера, то есть в $2 \times 2 = 4$ раза.

Итак, конь, размер которого в 2 раза больше, имеет в 8 раз больший вес и в 4 раза большую площадь шкуры, которая удерживает вместе все его внутренности. Получается, что шкура коня, который имеет вдвое больший размер, испытывает вдвое большее давление со стороны внутренних органов. Значит, если мы будем увеличивать размер нашего сферического коня, то в какой-то момент прочность шкуры окажется недостаточной, чтобы удерживать увеличивающийся вес внутренних органов, и коня разорвет. Мы только что получили очень важный результат: предел размера коня определяется не искусством селекционера и не биологическими законами, а законами физики.

Закон масштабирования, пример которого мы только что рассмотрели, не зависит от формы масштабируемого тела, поэтому мы ничего не потеряли, представив коня в виде сферы. Если бы я попытался вычислить объем настоящего коня и выяснить, как изменится его вес и площадь шкуры при увеличении линейных размеров, я получил бы точно такой же результат, только потратил бы на это неизмеримо больше времени и сил. Поэтому при исследовании данной

задачи сферический конь — это совершенно оправданная абстракция.

Теперь рассмотрим более приближенную к реальности аппроксимацию коня. Изобразим его в виде двух сфер, соединенных штангой:



Конь в виде двух сфер, соединенных штангой

Все, что мы говорили о масштабировании, остается в силе не только для коня целиком, но и для его отдельных частей. Например, голова суперконя будет весить в 8 раз больше, чем голова обычного коня. Теперь посмотрим на шею, представленную штангой. Прочность этой штанги пропорциональна ее сечению — очевидно, что более толстая штанга будет более прочной, чем более тонкая. При увеличении диаметра штанги в 2 раза площадь ее сечения увеличивается в 4 раза. Но смотрите: вес головы суперконя в 8 раз больше веса головы обычного коня, а прочность шеи — только в 4 раза. Таким образом, если мы будем увеличивать размеры коня, то в какой-то момент его штанга, то есть шея, переломится под весом его головы. Этим объясняется, почему головы гигантских динозавров были так непропорциональ-

но малы по сравнению с их туловищами и почему животные с большими по сравнению с их туловищами головами, такие как дельфины и киты, живут в воде: сила Архимеда компенсирует вес их тел, и требования к прочности существенно смягчаются.

Теперь мы понимаем, почему физик из анекдота не посоветовал бизнесмену попросту вырастить суперконя, который бы и победил на скачках. Даже используя такую простую абстракцию, как сферический конь, физик смог вывести ряд важных следствий относительно возможных размеров наземных млекопитающих, потому что принципы масштабирования физических объектов не зависят от их формы.

Используя наш простой пример, можно сделать еще много интересных выводов, но вернемся к Галилею. Самым важным среди его достижений следует считать созданное 400 лет назад описание движения — прекрасный пример абстрагирования от несущественных деталей.

Одним из наиболее очевидных результатов наивного наблюдения за окружающим миром является, на первый взгляд, очевидный вывод, что общее описание движения невозможно, потому что все тела движутся по-разному. Перо нежно порхает по ветру, в то время как камень стремительно падает вниз. Шары для боулинга, практически не меняя своей скорости, прямолинейно катятся по настилу, а газонокосилка ни за что не поедет, пока не заведешь мотор. Галилей пришел к выводу, что это наиболее очевидное свойство движения в реальном мире является наименее существенным для понимания его сути.

Маршалл Маклюэн мог бы сказать, что среда есть сообщение, однако Галилей значительно раньше обнаружил, что среда только мешает получать точные экспериментальные данные.

Философы до Галилея утверждали, что среда играет важную роль в движении, что движение без среды невозможно, но Галилей убедительно показал, что суть движения может быть понята лишь путем устранения влияния среды: «Каким образом не замечаете вы совершенно очевидных и часто встречающихся явлений, когда из двух тел, движущихся в воде, одно перемещается, например, во сто раз быстрее другого, тогда как при падении в воздухе скорость одного превышает скорость другого едва ли на одну сотую долю? Так, мраморное яйцо опускается в воде в сто раз быстрее куриного яйца; при падении же в воздухе с высоты двадцати локтей оно опережает куриное яйцо едва ли на четыре пальца»¹.

Основываясь на этом рассуждении, Галилей пришел к правильному выводу о том, что если мы полностью удалим среду, то все тела будут падать совершенно одинаково. Кроме того, он приготовил ответ на критику тех, кто не был готов к его абстрагированию от несущественных деталей для обнажения существенных: «Я не хотел бы, чтобы вы поступали как многие другие, отклоняя беседу от главного вопроса, и придирались к выражению, в котором я допустил отклонение от действительности на один волосок, желая скрыть за этой небольшой погрешностью ошибку другого, грубую, как якорный канат»².

Аристотель, по утверждению Галилея, сосредоточивал свое внимание не на сходстве в движении объектов, а на различиях, которые объясняются влиянием среды. С позиции

¹ Цитируется по книге «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению синьора Галилео Галилея Линчео, философа и первого математика светлейшего великого герцога тосканского с приложением о центрах тяжести различных тел», перевод С. Н. Долгова. — *Примеч. пер.*

² Там же.

Галилея, идеальный мир, в котором среда полностью отсутствует, и является тем самым «отклонением от действительности на один волосок».

После достижения указанного уровня абстракции все остальное оказывается очень простым: Галилей утверждал, что если убрать все внешние силы, действующие на тело, то предоставленное само себе, оно будет продолжать движение вдоль прямой линии с постоянной скоростью, независимо от того, как оно двигалось ранее.

В качестве примера ситуации, когда среда оказывает на движущееся тело очень слабое влияние, Галилей приводил скользящий по льду тяжелый камень: его движение остается прямолинейным, а скорость более-менее постоянной. Аристотель же считал, что естественным состоянием всех тел является состояние покоя, потому что он не сумел абстрагироваться от влияния среды.

Чем так важен вышеприведенный вывод Галилея? Он стирает различия между телом, которое движется равномерно, и телом, которое покоится. Движущиеся и покоящиеся тела идентичны в том, что они будут продолжать соответственно двигаться или покоиться до тех пор, пока на них не подействует внешняя сила. Единственное различие между движущимся и покоящимся телом — это величина скорости. Но постоянная скорость математически ничем не отличается от нулевой, ведь ноль — это точно такое же вещественное число, как и все остальные, не лучше и не хуже.

Это наблюдение позволило Галилею перенести свое внимание с положений объектов в пространстве на *изменение* их положений, то есть на скорость их перемещения. Если вы признаете, что в отсутствие каких-либо сил тело будет двигаться прямолинейно и с постоянной скоростью, то вам

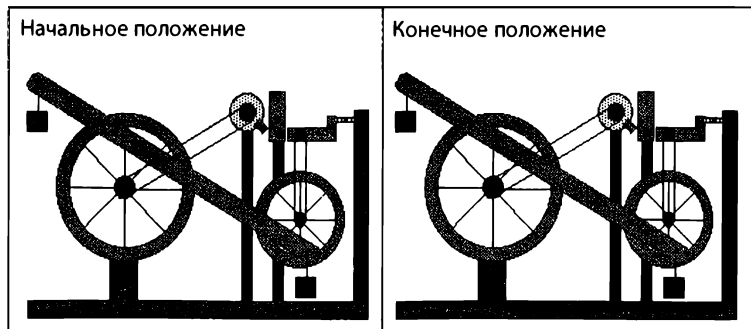
останется один маленький шаг (ну и, возможно, в придачу еще ум Ньютона), чтобы догадаться, что причиной изменения скорости тела является приложенная к нему внешняя сила. А если сила будет непостоянной во времени, то и скорость тела будет изменяться не монотонно. Об этом нам и говорит закон Ньютона. Вооружившись этим законом, можно понять законы движения всех окружающих тел и характер всех сил в природе — это те вещи, которые стоят за всеми изменениями во Вселенной, и они могут быть изучены: с этого момента натурфилософия превращается в современную физику. Но для того чтобы прийти к упомянутому закону, Ньютону понадобилось, подобно Галилею, отбросить несущественные детали и оставить только то, что действительно важно, а именно характер изменения скорости тела.

К сожалению, в попытках максимально подробно изучить какой-нибудь предмет или проблему мы часто упускаем что-нибудь важное и заикливаемся на второстепенном. Если примеры Галилея и Аристотеля кажутся вам слишком далекими, рассмотрим более близкую к нам ситуацию. Один мой родственник вместе с несколькими своими знакомыми — все они имели высшее образование, а один из них даже был учителем физики — вложили более миллиона долларов в проект по разработке нового двигателя, единственным источником энергии которого должно было быть гравитационное поле Земли. Движимые мечтами о преодолении мирового энергетического кризиса, уходе от зависимости от иностранной нефти и возможности сказочно разбогатеть, они убеждали себя в том, что машина обязательно заработает, нужно только приложить еще немного усилий и потратить еще немного денег.

Эти люди, разумеется, не были настолько наивными, чтобы считать, что можно получить что-то из ничего. Они не подо-

зревали, что вкладывают деньги в очередной вечный двигатель. Они предполагали, что этот двигатель каким-то образом будет извлекать энергию из гравитационного поля. Устройство имело такое огромное количество шестерней, шкивов и рычагов, что инвесторы были не в состоянии ни прояснить себе принцип действия машины, ни понять особенностей ее конструкции. Во время демонстрации после освобождения тормоза главный маховик машины начинал вращаться, постепенно набирая обороты, и продолжал свое вращение в течение всего времени демонстрации. Это казалось инвесторам очень убедительным.

Несмотря на чрезвычайную сложность деталей машины, если абстрагироваться от всего несущественного и второстепенного, можно понять, почему такая машина не должна работать. Рассмотрим принципиальную схему прототипа описанной машины, приведенную на рисунке. Я изобразил начальное и конечное положение механизма, ведь как бы ни была сложна машина, рано или поздно все вращающиеся и движущиеся части должны оказаться в том же самом положении, в котором они были в момент запуска, и вечно работающая машина должна проходить через это состояние бесконечное количество раз.



Итак, рано или поздно механизм должен пройти через такое положение, когда каждый рычаг, каждый шкив, каждая гайка, каждый болт окажутся в точности на том же месте и в том же положении, что и в начальный момент. То есть ничто не сдвинулось, ничего не упало, ничего не испарилось.

Попытка разобрать принцип работы этой машины с инженерной точки зрения упирается в необходимость учета движения огромного количества деталей и действующих на них сил. Рассмотрение же с физической точки зрения предлагает вместо этого сосредоточиться на главном. Заключим всю конструкцию в черный ящик, или, если хотите, в черную сферу и оставим только одно простое требование: если что-то производит работу, то энергия, необходимая для этой работы, должна быть извлечена изнутри этого чего-то или получена извне. Но если за полный цикл внутри ничего не изменилось, то и энергии взяться неоткуда!

Но откуда мы узнаем, что важно, а что нет, приступая к решению задачи? Как правило, ниоткуда. Все, что нам остается, это идти вперед и надеяться на то, что выбранный нами путь — верный, а полученные в конце его результаты будут иметь смысл. Как любил повторять Ричард Фейнман, «К черту торпеды, полный вперед!»¹

Предположим, к примеру, что мы хотим понять внутреннее устройство Солнца. Для того чтобы обеспечить наблюдаемую светимость солнечной поверхности, в его горячих и плотных недрах должна выделяться энергия, эквивалентная ежесекундному взрыву сотни миллиардов водородных бомб! Невозможно даже представить себе, как подступиться к задаче точного расчета всех чудовищных турбулентных про-

¹ На самом деле это присказка адмирала Дьюи, а Фейнман использовал ее в метафорическом смысле.

цессов, происходящих внутри Солнца. Однако, к счастью для нас, солнечная печь бесперебойно и спокойно функционирует на протяжении миллиардов лет, из чего мы можем предположить, что происходящие внутри Солнца процессы хорошо сбалансированы. Простейшее альтернативное и, что более важно, поддающееся аналитическому исследованию решение базируется на предположении, что недра Солнца находятся в состоянии *гидростатического равновесия*. Это означает, что ядерные реакции, протекающие внутри Солнца, выделяют такое количество энергии, которое достаточно для разогрева солнечного вещества до температуры, приводящей к такому давлению, которое способно уравновесить вес вышележащих слоев солнечного вещества, не давая им рухнуть вниз под действием силы тяжести. Если Солнце немного сжимается, температура и давление в его недрах растут, что приводит к ускорению ядерных реакций, выделению дополнительного количества энергии, еще больше разогревающей солнечные недра, что приводит к еще дальнейшему росту температуры, увеличению давления и расширению Солнца. Аналогично, если Солнце немного расширится, его ядро охладится, ядерные реакции замедлятся, температура ядра упадет еще больше, и это приведет к сжатию Солнца до прежнего размера. Таким способом Солнце автоматически поддерживает скорость ядерных реакций на определенном уровне в течение длительного промежутка времени. В каком-то смысле Солнце работает подобно поршню в двигателе вашего автомобиля, когда вы едете по шоссе с постоянной скоростью.

Однако одного этого предположения еще недостаточно, чтобы построить численную модель внутреннего устройства Солнца. Следует сделать дополнительные упрощающие предположения. Во-первых, будем считать Солнце шаром. В частности, это означает, что Солнце обладает сфериче-

ской симметрией, то есть в каком бы направлении из центра Солнца мы ни двинулись, мы всегда будем наблюдать одни и те же изменения состояния солнечного вещества. Его свойства — химический состав, плотность, давление и температура — будут зависеть только от расстояния от центра, но не от направления. Во-вторых, мы пренебрежем влиянием множества других факторов, которые могут сильно усложнить расчет, например исключим из рассмотрения магнитные поля.

В отличие от предположения о гидростатическом равновесии, перечисленные в предыдущем абзаце предположения не следуют из основных физических законов. Более того, мы знаем из наблюдений, что Солнце вращается вокруг своей оси, что на его поверхности имеются темные образования, называемые солнечными пятнами, что разные части солнечной поверхности обращаются с разной скоростью и что количество солнечных пятен меняется циклически с периодом около одиннадцати лет. Но мы игнорируем все эти сложности, потому что, с одной стороны, они, прощу прощения за тавтологию, сильно усложняют расчеты, а с другой стороны — выглядит вполне правдоподобным предположение, что кинетическая энергия вращения Солнца и процессы, происходящие на солнечной поверхности, играют очень незначительную роль в общем энерговыделении Солнца, и их можно без зазрения совести отбросить в свете нашей задачи.

Но насколько хорошо работает эта модель? Лучше, чем мы могли бы ожидать. Она предсказывает размеры Солнца, температуру его поверхности, светимость и возраст с очень хорошей точностью. Более того, подобно хрустальному бокалу, вибрирующему, когда вы водите мокрым пальцем по его краю, или Земле, колеблющейся, когда где-то в ее коре

происходит землетрясение, Солнце тоже испытывает колебания, возбуждаемые происходящими в его недрах процессами. Эти колебания приводят к периодическим движениям поверхности Солнца, которые можно наблюдать с Земли, и их частота и амплитуда могут многое рассказать нам о строении солнечных недр, подобно тому как сейсмические колебания в земной коре позволяют нам обнаруживать залежи полезных ископаемых или нефтяные месторождения. Стандартная солнечная модель — модель, основанная на перечисленных выше предположениях, — более-менее точно предсказывает частотный спектр наблюдаемых колебаний солнечной поверхности.

Таким образом, представление Солнца в виде сферического газового шара в вакууме дает нам модель, которая оказывается весьма близкой к реально наблюдаемой картине. Но существует одна проблема. Помимо света и тепла, идущие внутри Солнца ядерные реакции производят и множество других вещей, наиболее интересными из которых являются элементарные частицы, называемые *нейтрино*. Эти частицы имеют важное отличие от частиц, из которых состоит обычное вещество: они настолько слабо взаимодействуют с ним, что большинство нейтрино пролетают сквозь всю толщу Солнца и сквозь всю толщу Земли, даже не замечая ее.

За то время, в течение которого вы читали предыдущее предложение, сквозь ваше тело пролетело порядка триллиона нейтрино, рожденных в раскаленных солнечных недрах. Причем неважно, днем или ночью вы читаете эти строки, поскольку толща Земли, как я уже сказал, не является для нейтрино сколько-нибудь заметным препятствием. Предсказанные в 1930-х годах нейтрино сегодня играют очень важную роль в нашем понимании природы. Но солнечные нейтрино поставили ученых в тупик.

Стандартная солнечная модель, так замечательно предсказывающая все основные наблюдательные характеристики Солнца, позволяет нам вычислить, какое количество нейтрино, рождаемых в недрах Солнца, должно достигать земной поверхности. И хотя вы, возможно, подумали, что этих неуловимых тварей невозможно обнаружить, ученые все-таки научились их регистрировать. Для этого были построены огромные подземные лаборатории, в которых экспериментаторы сутками напролет терпеливо ждут, когда одно из множества нейтрино будет обнаружено детектором. Такие детекторы называются *нейтринными телескопами*. Первый из них был построен в глубокой шахте в штате Южная Дакота. Приемником нейтринного излучения в нем служил горизонтальный цилиндрический бак длиной около 14 метров, содержащий примерно 400 000 литров перхлорэтилена. В редких случаях один из атомов хлора в этом объеме под действием нейтрино превращался в атом аргона, что давало возможность оценить число летящих к нам от Солнца нейтрино. После двадцати пяти лет исследований было обнаружено, что количество регистрируемых нейтрино в 3–4 раза меньше, чем предсказывает Стандартная солнечная модель.

Вашей первой реакцией на это сообщение может быть пожимание плечами — зачем так много шума из ничего. Предсказание результатов, которые по порядку величины согласуются с экспериментами, уже можно рассматривать как большой успех, поскольку эти предсказания опираются на довольно грубые предположения об устройстве солнечной печи.

И действительно, многие физики восприняли это всего лишь как свидетельство того, что по крайней мере одно из принятых приближений является слишком грубым. Другие,

прежде всего те, кто участвовал в разработке Стандартной солнечной модели, утверждали, что это крайне мало вероятно, поскольку во всех остальных предсказаниях модель демонстрировала прекрасное согласие с наблюдениями.

В 1990-х годах, однако, ученые провели серию героических экспериментов, которые наконец раскрыли эту тайну. Первая серия экспериментов проводилась на гигантском подземном детекторе, содержавшем 50 000 тонн воды. Этот детектор позволял обнаруживать достаточно много нейтрино, чтобы с очень высокой точностью подтвердить, что поток нейтрино, идущий от Солнца, действительно меньше, чем ожидалось.

Затем в Садбери в Канаде был построен подземный детектор нового поколения, в котором вместо обычной воды использовалась тяжелая. Я не упомянул, что все предыдущие нейтринные детекторы были способны регистрировать только один тип нейтрино — *электронный*. А в природе существует три типа этих элементарных частиц: *электронные, мюонные и тау-лептонные*. Но поскольку в ходе ядерных реакций внутри Солнца генерируются только электронные нейтрино, считалось логичным именно их и ловить в первую очередь.

Одним из возможных путей решения проблемы солнечных нейтрино могло бы стать предположение, что электронные нейтрино, рождаемые в недрах Солнца, за время своего пути к Земле каким-то образом превращаются в нейтрино других типов. Это потребовало бы привлечения для объяснения новых физических процессов, не описываемых теорией, известной как *Стандартная модель* физики элементарных частиц, в частности это потребовало бы, чтобы нейтрино, считавшиеся до этого безмассовыми, имели очень небольшую массу. В этом случае часть электронных нейт-

рино должна превращаться в нейтрино других типов, и количество регистрируемых на Земле электронных нейтрино окажется меньше, чем их исходное количество, рожденное в центре Солнца.

Детектор на тяжелой воде был в состоянии одновременно обнаруживать электронные, мюонные и тау-лептонные нейтрино. И вот, когда пыль улеглась и были подсчитаны все пойманные типы нейтрино, оказалось, что общее количество нейтрино, прилетающих от Солнца, в точности соответствует предсказаниям Стандартной солнечной модели! Так были открыты нейтринные осцилляции, массы нейтрино, а несколько счастливых физиков получили Нобелевскую премию. В очередной раз модель сферического коня в вакууме, только на этот раз — коня Гелиоса, оказалась мощным инструментом изучения природы.

Мы можем попытаться распространить представление о Солнце как о сферическом газовом шаре в вакууме и на другие звезды, более крупные, более мелкие, более старые, более молодые. В частности, простая модель гидростатического равновесия дает нам грубое представление об изменениях, которые происходят в звездах на протяжении их жизни. Например, в какой-то момент рождения звезды, когда она формируется из сжимающегося облака межзвездного газа, в ней «включаются» термоядерные реакции, и она начинает светить за счет собственного источника энергии. Если звезда слишком мала, гравитационной энергии сжимающегося газового облака может оказаться недостаточно для достижения температуры, при которой включаются реакции синтеза. В этом случае звезда никогда не загорится. Примером такой «недозвезды» является Юпитер. Однако для массивных газовых облаков процесс сжатия продолжается до включения ядерных реакций, и выделяемое ими тепло

повышает температуру звездных недр, что создает дополнительное давление, останавливающее сжатие и стабилизирующее звезду. В конце жизни звезды водорода, служащий топливом для ядерных реакций, начинает истощаться, равновесие нарушается, и звезда снова сжимается, пока температура в ее ядре не достигнет значений, при которых становится возможным новый набор реакций, топливом для которых служит образовавшийся на предыдущем этапе гелий.

Для многих звезд этот процесс повторяется несколько раз: каждый раз, когда истощается очередной элемент, служивший топливом для ядерных реакций, ядро звезды опять сжимается, поднимая температуру и запуская новый набор реакций синтеза. В то время как внешние слои звезды раздуваются до невероятных размеров, превращая звезду в красный гигант, ядро становится все горячее и плотнее, пока почти все его вещество не превратится в железо. На этом все заканчивается, потому что железо не может служить топливом для ядерных реакций, идущих с высвобождением энергии. Протоны и нейтроны ядер железа так сильно связаны друг с другом, что преобразовать его в ядро другого элемента можно, лишь затратив энергию. Что происходит после этого? Одно из двух: либо звезда медленно умирает, освобождаясь от распухшей внешней оболочки и превращаясь в белый карлик, либо происходит одно из самых грандиозных событий во Вселенной — звезда взрывается!

Взрывающаяся звезда, или *сверхновая*, выделяет в короткий промежуток такое количество энергии, что светит как вся галактика, ярче ста миллиардов обычных звезд. За секунды до начала взрыва звезда, спокойно «дожигаящая» остатки ядерного горючего, внезапно выходит из состояния гидростатического равновесия. В какой-то момент генерация энергии оказывается недостаточной, чтобы поддерживать

температуру, необходимую для создания давления, сдерживающего вес вышележащих слоев, и они начинают падать на ядро звезды, которое к этому времени имеет массу, сравнимую с массой Солнца, а размер — порядка размера Земли. Это ядро, в свою очередь, менее чем за секунду сжимается до размера порядка 10 километров. Его плотность достигает гигантских значений — одна чайная ложка такого вещества весит тысячи тонн. Еще более важно, что при таких плотностях атомы железа переходят в совершенно новое, нейтронное, состояние. Ядро как будто бы внезапно застывает, «схватывается», подобно затвердевшему клею. Падающее на ядро вещество отскакивает от него и порождает мощную ударную волну, распространяющуюся наружу и раздувающую оболочку звезды, которая и видна нам как сверхновая.

Эта модель коллапса ядра и последующего взрыва звезды была построена в течение десятилетий кропотливой работы физиков и математиков, после того как Чандрасекар в 1939 году впервые предположил возможность подобного катастрофического сценария. И все это не более чем развитие простой идеи гидростатического равновесия, которое, как мы считаем, определяет структуру Солнца. Еще без малого пятьдесят лет после работ Чандрасекара описания процессов, приводящих к взрыву сверхновой, оставались чистой воды теоретическими спекуляциями. Даже когда астрономы научились наблюдать вспышки сверхновых в других галактиках, все их наблюдения сводились только к изучению видимого оптического излучения сбрасываемой оболочки и не позволяли непосредственно увидеть то, что происходит внутри звезды.

Все изменилось 23 февраля 1987 года. В этот день взорвалась сверхновая в Большом Магеллановом Облаке — карликовой галактике, являющейся спутником нашей звездной системы,

находящейся от нас на расстоянии около 150 000 световых лет. Это была самая близкая к нам сверхновая, вспыхнувшая за последние четыре столетия. Впервые было экспериментально подтверждено, что оптический фейерверк — это лишь верхушка айсберга. Энергия в тысячи раз большая, чем наблюдается в оптическом диапазоне, уносится — возможно, вы уже догадались — почти неуловимыми нейтрино. Я говорю «почти», поскольку, несмотря на то что нейтрино свободно пролетают через толщу Земли, все же очень редко они взаимодействуют с веществом и попадают в наши детекторы.

Можно подсчитать, что плотность потока нейтрино от взрыва далекой сверхновой такова, что каждый миллионный житель Земли, если бы в нужное время сидел в абсолютной темноте, увидел бы вспышку света, возникшую из-за того, что нейтрино провзаимодействовал с одним из атомов в его глазу.

К счастью, нам нет нужды зависеть от случайных свидетелей вспышек в их глазах. У нас есть два гигантских технических нейтринных глаза — два крупных детектора, каждый из которых содержит более 1000 тонн воды, расположенных глубоко под землей на противоположных сторонах земного шара. В каждом из резервуаров этих детекторов в кромешной темноте за объемом воды наблюдают тысячи чувствительных фотодатчиков, и вот 23 февраля, в течение 10 секунд в обоих детекторах синхронно были зафиксированы 19 нейтринных событий. Вам это может показаться мелочью, но это именно то количество нейтринных событий, которые, согласно предсказаниям теоретиков, должны были зафиксировать детекторы при вспышке сверхновой на другой стороне нашей Галактики. Кроме того, время прилета этих нейтрино и их энергия оказались в прекрасном согласии с теорией.

Всякий раз, когда я думаю об этом, я не перестаю удивляться. Эти нейтрино были рождены непосредственно в сверхплотных недрах коллапсирующего ядра звезды. Они несут нам прямую информацию об этих решающих секундах, в течение которых происходит коллапс. И они говорят нам, что теория, описывающая гравитационный коллапс, построенная задолго до получения первых эмпирических подтверждений, базирующаяся на все том же гидростатическом равновесии, которое отвечает за внутреннее устройство Солнца, полностью согласуется с новейшими наблюдательными данными о взрывах сверхновых. Уверенность в нашей простой модели позволила нам понять, как происходит один из самых экзотических и феерических процессов в природе.

Я приведу еще один пример замечательной предсказательной силы приближения Солнца в виде сферы. Несмотря на то что мы разгадали загадку солнечных нейтрино, у нас все равно остается одна нерешенная проблема, касающаяся внутреннего строения звезд. Если мы экстраполируем Стандартную солнечную модель на другие звезды, то сможем более-менее точно предсказать их эволюцию. Для Солнца стандартная модель дает возраст около 4,55 миллиарда лет. Но когда астрофизики применили эту модель к наиболее старым звездам, входящим в шаровые скопления, находящиеся на периферии Галактики, у них получилось, что возраст таких звездных скоплений превышает 15 миллиардов лет.

В то же время мы можем, используя тот факт, что наблюдаемая нами Вселенная расширяется, и предполагая, что это расширение с течением времени замедляется из-за гравитационного притяжения между галактиками, оценить возраст Вселенной, взяв за основу сегодняшнюю скорость ее расширения. Первое грубое приближение будет выглядеть следующим образом: мы измеряем скорости, с которыми

галактики удаляются друг от друга, учитываем, что раньше они удалялись друг от друга быстрее, вычисляем, насколько быстрее, и таким образом получаем верхнюю оценку времени, которое прошло от начала расширения, то есть от момента Большого взрыва. За последние восемьдесят лет космологам удалось определить скорость расширения Вселенной с точностью до 10 %. На основе полученных ими данных наше первое приближение дает возраст Вселенной около 11 миллиардов лет.

Вот и суть упомянутой проблемы: возраст старейших звезд в Галактике оказывается больше возраста Вселенной! Но ученые не в первый раз сталкиваются с проблемой определения возраста звезд, и во все предыдущие разы проблема успешно разрешалась, а ученые в результате получали новые знания об устройстве мира. Например, в 1800-х годах оценка возраста Солнца, основанная на предположении, что источником его энергии служит горение угля, давала значение около 10 000 лет. Хотя эта оценка чудесным образом согласовывалась с тем, что написано в Библии относительно времени существования нашего мира, к тому времени уже было показано, что ископаемые окаменелости и геологические пласты земной коры намного старше. Затем, в конце XIX века, два известных физика, лорд Кельвин из Великобритании и Гельмгольц из Германии, показали, что если энергия, которую излучает Солнце, будет освобождаться за счет его гравитационного сжатия, то подобный процесс сможет обеспечить существование нашего светила на протяжении 100 миллионов лет. Хотя эта оценка была значительно лучше предыдущей, к тому моменту геология и эволюционная биология уже свидетельствовали о том, что возраст Земли превышает миллиард лет, и ситуация, при которой Земля оказывалась старше Солнца, не вызывала восторга у ученых.

В 1920 году проблема стала настолько серьезной, что уважаемый астрофизик сэр Артур Стэнли Эддингтон заявил, что в природе просто обязан существовать другой, еще не известный науке механизм производства энергии, способный обеспечить наблюдаемую светимость Солнца на протяжении нескольких миллиардов лет. Многие отнеслись к его заявлению скептически. Несмотря на то что вычисления показывали, что температура в центре Солнца должна достигать десятков миллионов градусов, что по земным меркам достаточно жарко, физики считали, что это все же недостаточно горячо, чтобы придумывать для таких температур новую физику. Эддингтон в одном из своих заявлений предложил несогласным с его идеей отправиться «поискать место погорячее».

Как оказалось, Эддингтон был прав, и в 1930-х годах физик Ханс Бете, которого я еще упомяну в дальнейшем, показал, что недавно обнаруженные ядерные реакции действительно способны обеспечить Солнце энергией на 10 миллиардов лет. За эту работу, которая легла впоследствии в основу Стандартной солнечной модели, Бете получил Нобелевскую премию.

Прежде чем подвергать ревизии Стандартную солнечную модель в отношении применимости ее к определению возрастов старейших звезд, мы с коллегами решили еще раз пересмотреть оценку возрастов шаровых скоплений. В этой оценке содержалась неопределенность, уменьшив которую мы получили новое значение — по нашим выкладкам выходило, что самые старые шаровые скопления в галактике должны иметь возраст около 12 миллиардов лет, но это все равно оказывалось больше возраста Вселенной. Таким образом, конфликт между Стандартной солнечной моделью и космологией был налицо.

Поскольку не только этот результат, но и другие независимые наблюдательные данные находились в противоречии с моделью замедляющегося расширения Вселенной, в 1995 году мы с моим коллегой из Чикаго вынуждены были (в какой-то мере даже в шутку) предположить, что расширение Вселенной не замедляется, а ускоряется. Каким бы неправдоподобным ни выглядело это предположение, но на самом деле экзотическая возможность существования гравитационного отталкивания была предложена Альбертом Эйнштейном еще в 1916 году, вскоре после создания им общей теории относительности, когда он обнаружил, что статическая модель Вселенной, в которой действуют одни только силы притяжения, является неустойчивой. Его гипотеза была отвергнута, когда было обнаружено, что Вселенная расширяется. Следует заметить, что наше предположение не было чисто умозрительным, как может показаться на первый взгляд. Мы уже знали, что дополнительная отталкивающая гравитационная сила может возникать, если пустое пространство обладает особой формой энергии, допускаемой в контексте современной теории элементарных частиц.

И что бы вы думали? В 1998 году сразу две группы исследователей на основе наблюдений за вспышками сверхновых в далеких галактиках сумели построить зависимость скорости расширения Вселенной от времени. И они независимо обнаружили, что Вселенная расширяется с ускорением! Это экспериментальное открытие полностью изменило наше представление о расширяющейся Вселенной, сделав задачу понимания природы той темной энергии, которая ответственна за возникновение отталкивающей силы, наиболее важной проблемой в современной космологии. Самым интересным для нас оказался тот факт, что возраст Вселенной, определенный по этим наблюдениям, оказался равным при-

мерно 13–14 миллиардам лет, и это находилось в идеальном согласии с результатами вычисления возрастов самых старых звезд в нашей Галактике.

Вот так простейшее приближение звезды как сферического газового облака в вакууме вот уже на протяжении 200 лет приводит нас к обнаружению все более и более глубоких закономерностей во Вселенной.

Предыдущие примеры, демонстрирующие мощь метода аппроксимации в физике при совершении великих открытий, на самом деле скрывают за собой более фундаментальный факт: без аппроксимации в физике мы не можем сделать вообще ничего. Используя то или иное приближение, мы делаем предсказания, которые затем могут быть проверены. Если предсказания оказываются неверными, мы сосредоточиваемся на различных аспектах сделанных приближений, уточняем их и именно таким способом в конце концов приходим к более-менее точному представлению об устройстве Вселенной. По словам Джеймса Клерка Максвелла, наиболее известного и успешного физика XIX века, «правильная теория ставит перед экспериментаторами новые задачи, не препятствуя развитию самой теории»¹.

Иногда физики упрощают картину мира, руководствуясь своей интуицией, но чаще всего они делают это, потому что у них нет иного выбора. Существует известная аллегория, которую любят повторять физики: «Если вы ночью на плохо освещенной улице обнаружите, что потеряли ключи от автомобиля, где в первую очередь вы станете их искать? Разумеется, под ближайшим фонарем. Почему? Не потому, что вы, возможно, потеряли ключи именно в этом месте,

¹ James Clerk Maxwell, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, ed. W.D. Niven (New York: Dover, 1965).

а потому, что это единственное место, где имеется хоть какая-то вероятность их найти». В своей научной работе большинство физиков руководствуются именно этим принципом: они ищут там, где светло.

Природа так часто бывает к нам благосклонна, что мы привыкли принимать это как должное. Любую новую проблему мы пытаемся решать при помощи старых проверенных методов не потому, что они годятся для этого, а потому, что на тот момент у нас, как правило, нет других. Если повезет, мы можем надеяться, что даже грубое приближение принесет нам какое-нибудь новое понимание некоторого физического аспекта. Физика полна примеров, когда поиск там, где светло, приносил гораздо больше, чем мы имели право ожидать. Одним из таких примеров может служить событие, произошедшее вскоре после окончания Второй мировой войны, которое стало лишь звеном большой цепи, приведшей к появлению новейшей физики. Окончательным результатом этой цепи событий явилась та картина мира, которую мы сегодня считаем наиболее приемлемой. Я не встречал обсуждения этого вопроса в популярной литературе, несмотря на то что он имеет основополагающее значение для современной физики.

Война закончилась, и физики, освободившись от необходимости работать на военных, наконец вернулись к исследованию основополагающего вопроса, вставшего после завершения двух великих революций XX века, приведших к появлению теории относительности и квантовой механики. Теперь перед ними стояла новая задача: примирить друг с другом обе теории. Более подробно я расскажу о них в следующих главах, пока же остановимся на наиболее важных их аспектах. Квантовая механика имеет дело с явлениями, происходящими на *малых масштабах* — как простран-

ства, так и времени. И она утверждает, что на этих масштабах существуют пары параметров, которые не могут быть точно измерены одновременно. Например, невозможно в один и тот же момент времени одинаково точно определить скорость и положение частицы, независимо от того, насколько хороша наша измерительная аппаратура. Аналогично, нельзя точно определить энергию частицы, если измерения производятся в течение короткого интервала времени. Теория относительности же предполагает, что измерения координат, скорости, времени и энергии связаны друг с другом фундаментальными соотношениями, особенности которых становятся наиболее очевидными, когда скорость тела приближается к скорости света. Глубоко внутри атомов составляющие их частицы движутся достаточно быстро, чтобы эффекты теории относительности становились существенными, но в то же время масштабы явлений достаточно малы, чтобы тут уже в полную силу работали и законы квантовой механики. Самым замечательным следствием брака этих двух теорий является предсказание, что, когда промежуток времени настолько мал, что невозможно определить, какое количество энергии содержится в определенном объеме, становится невозможно определить, сколько частиц находится внутри этого объема. Рассмотрим, к примеру, движение электрона из электронной пушки к экрану в кинескопе телевизора. Электроны — это микроскопические заряженные частицы, которые, наряду с протонами и нейтронами, составляют все атомы обычного вещества. В металлах электроны, двигаясь под действием электрических сил, создают электрический ток. Если металлическую проволоку нагреть, то содержащиеся в ней электроны начнут отрываться от нее и при наличии электрического поля полетят в сторону экрана. Врезаясь в экран, электроны порождают световые вспышки, которые и формируют изображение. Так вот, законы

квантовой механики говорят нам, что для любого очень короткого интервала времени невозможно указать точно, по какой траектории движется электрон, и в то же самое время узнать его скорость. При добавлении в эту картину теории относительности выходит, что в течение этого короткого интервала нельзя утверждать с уверенностью, что существует только *один* электрон, движущийся в выбранной области пространства. Существует вероятность, что в этот момент времени спонтанно появится *другой* электрон вместе со своей античастицей — позитроном, имеющим противоположный заряд. Эта пара частиц появляется из пустого пространства и путешествует вместе с нашим электроном в течение короткого промежутка времени, а затем лишние частицы исчезают — аннигилируют друг с другом, снова оставляя наш электрон в одиночестве. Дополнительная энергия, необходимая для рождения электрон-позитронной пары, возникает из ниоткуда и после их аннигиляции снова исчезает в никуда, и все потому, что на очень коротком промежутке времени энергия, согласно законам квантовой механики, не может быть измерена точно.

Трезво поразмыслив над только что описанной ситуацией, вы могли бы прийти к выводу, что все это выглядит как попытка сосчитать количество ангелов на острие иглы. Но между ангелами и виртуальными частицами имеется существенное различие. Электрон-позитронные пары не исчезают совсем бесследно. Подобно улыбке Чеширского кота, которая хоть и не осязаема, но видима, виртуальные электрон-позитронные пары едва уловимо изменяют некоторые свойства электрона, и эти изменения можно измерить.

В 1930 году было признано, что такие явления, включая само существование античастиц, подобных позитрону, являются неизбежным следствием соединения квантовой механики

и теории относительности. Нерешенным оставался лишь вопрос, как посчитать вклад всех возможных виртуальных частиц в конечное значение измеряемых физических величин. Проблема состояла в том, что чем на меньших расстояниях мы хотим подсчитать какой-то параметр, тем больше виртуальных частиц нам необходимо включать в расчет. Например, мы рассчитываем движение электрона, и в какой-то момент рядом с ним возникает электрон-позитронная пара. Теперь нам нужно для этого короткого промежутка времени учитывать движение уже трех частиц. Но чем меньше промежуток времени, тем больше неопределенность энергии, значит, рядом с каждой из частиц может возникнуть новая электрон-позитронная пара и так далее. Попытка учесть все возможные виртуальные частицы приводила к бесконечным результатам. Это физиков, разумеется, не устраивало.

Вот в такой ситуации в апреле 1947 года в маленьком отеле на Шелтер Айленде, небольшом островке около восточной оконечности Лонг-Айленда, состоялась встреча группы теоретиков и экспериментаторов, занимавшихся фундаментальными проблемами структуры материи. Среди них были как маститые старики, так и молодые радикалы, многие из которых провели последние годы в работе над созданием ядерного оружия. Некоторым из них возвращение к мирным проблемам академической науки после стольких лет работы на военных давалось нелегко. Это тоже было одной из причин созыва конференции на Шелтер Айленде, которая должна была очертить круг наиболее важных проблем, стоявших перед физикой.

Началось все весьма благоприятно. Автобус с участниками конференции был встречен полицейским эскортом на мотоциклах, едва он пересек границу округа Нассау на западе Лонг-Айленда; эскорт сопровождал автобус с включенными

сиренами до самого места назначения. Позже ученые узнали, что эскорт был предоставлен в качестве благодарности полицейскими, которые служили во время войны на Тихом океане и считали, что их жизни были спасены благодаря созданному этими учеными ядерному оружию.

Предконференционное возбуждение было вызвано ожиданием запланированного на первый день сообщения о сенсационном открытии. Специализировавшийся в области атомной физики экспериментатор Уиллис Лэмб собирался представить важный результат, полученный им в Колумбийском университете благодаря микроволновой технологии, разработанной в ходе работы над военным радаром. Одним из ранних успехов квантовой механики был расчет энергий внешних атомных электронов. Однако Лэмб обнаружил, что уровни энергии электронов в атомах слегка отличаются от тех, которые получаются из квантово-механических расчетов, выполненных без учета эффектов теории относительности. Это явление сегодня известно как *лэмбовский сдвиг*. Затем ожидался доклад маститых экспериментаторов И. А. Раби и П. Куша, обнаруживших аналогичные отклонения у атомов водорода и других элементов. Все трое — Лэмб, Раби и Куш — позже удостоились за свое открытие Нобелевской премии.

Вызов был брошен. Чем может быть объяснен подобный сдвиг и как произвести расчет, чтобы избежать бесконечных результатов, вызванных необходимостью учета всех возможных виртуальных электрон-позитронных пар? Мысль о том, что объединение теории относительности и квантовой механики, приводящее к описанным выше проблемам, может привести также и к объяснению лэмбовского сдвига, в то время была лишь смелым предположением. Учет эффектов теории относительности приводил к такому усложнению

процесса вычисления, что никто и понятия не имел, как такие вычисления производить. На конференции присутствовали молодые восходящие звезды теоретической физики: Ричард Фейнман, Джулиан Швингер и Синъитиро Томонага.

Каждый из них самостоятельно разрабатывал свой способ борьбы с вычислительными трудностями, создавая то, что впоследствии стало называться *квантовой теорией поля*. Они надеялись, и их надежды позже оправдались, что эти способы позволят каким-то образом изолировать, если не полностью исключить из результата бесконечности, возникающие при учете всех виртуальных пар частиц, делавших теорию невероятно сложной, хотя предварительные расчеты давали результаты, согласующиеся с теорией относительности.

К моменту завершения своей работы им удалось создать новый способ представления элементарных процессов и продемонстрировать, что теория электромагнетизма может последовательно сочетаться с квантовой механикой и теорией относительности, за что почти 20 лет спустя они заслуженно разделили Нобелевскую премию. Но в то время, когда проходила конференция, ничего этого известно еще не было. Как можно учесть взаимодействие электрона в атоме с мириадами виртуальных электрон-позитронных пар, спонтанно возникающих из вакуума в ответ на поля, создаваемые самими электронами?

На конференции был и Ханс Бете, к тому времени уже выдающийся теоретик и один из лидеров Манхэттенского проекта. Бете тоже впоследствии получил Нобелевскую премию за работу, демонстрирующую, что термоядерные реакции действительно служат источником энергии звезд. Он был настолько вдохновлен тем, что услышал от теоретиков и экспериментаторов, что, вернувшись в Корнелльский

университет, немедленно занялся расчетом эффекта лэмбовского сдвига. Через пять дней после окончания конференции он подготовил статью, в которой утверждал, что получил отличное теоретическое согласие с величиной наблюдаемого эффекта. Бете всегда был известен своей способностью безупречно выполнять сложные вычисления на доске или на бумаге. Тем не менее его замечательный расчет лэмбовского сдвига не был полностью самосогласованным в плане объединения квантовой механики и теории относительности. Впрочем, получение окончательного строгого результата не особо волновало Бете, его больше интересовала правильность выбранного им пути. Для получения строгого результата в то время еще просто не существовало необходимых математических инструментов, и он использовал то, что оказалось под рукой.

Он решил, что раз мы не в состоянии последовательно описать релятивистское движение электрона, то можно попытаться произвести «гибридные» вычисления, явно добавив такие эффекты, как рождение и аннигиляция электрон-позитронных пар, к уравнениям движения электронов, выведенных квантовыми механиками в 1920-х и 1930-х годах, которые решаются достаточно просто. Однако он обнаружил, что учет эффектов рождения виртуальных электрон-позитронных пар все равно приводит к расходимости решения. Как с этим справиться?

Основываясь на предложении, услышанном им на конференции, Бете произвел расчет дважды: один раз для электрона в атоме водорода и один раз для свободного электрона. Хотя в каждом конкретном случае результат получался бесконечным, он надеялся, что при вычитании одного результата из другого бесконечности также вычтутся друг из друга, и «в сухом остатке» мы получим интересующий нас

эффект в виде конечного числа — величины лэмбовского сдвига. К сожалению, у него ничего не получилось. Тогда он предположил, что, возможно, используемая математическая модель, в которой мы учитываем рождение виртуальных частиц вплоть до бесконечно малых пространственных и временных масштабов, просто не имеет физического смысла, и следует, руководствуясь физической интуицией, наложить на нее дополнительные ограничения. Бете предложил ограничить число учитываемых при расчете виртуальных частиц, так чтобы их общая энергия не превышала по порядку величины массу электрона.

Я напомню, что квантовая механика разрешает процессы, в которых участвует множество высокоэнергетичных виртуальных частиц, если промежуток времени, в течение которого эти процессы происходят, достаточно мал, чтобы квантово-механическая неопределенность энергии превосходила суммарную энергию, необходимую для протекания этих процессов. Бете же утверждал, что, если теория претендует на согласие с общей теорией относительности, она должна содержать что-то, ограничивающее максимально возможную энергию виртуальных процессов. То есть он предложил попросту игнорировать бесконечное количество рождений виртуальных пар, оборвав расчет на каком-нибудь наперед выбранном значении энергии. Его окончательный расчет лэмбовского сдвига учитывал только такие процессы, энергия которых была меньше энергии покоя электрона. Кроме того, Бете был полностью согласен с критическими возражениями о слишком волюнтаристском подходе к выбору накладываемых на теорию ограничений.

В то время действительно не было никаких реальных обоснований для выбора конкретного значения энергии, на котором следует обрывать вычисления, но его подход по-

зволяя получить разумное конечное приближение для величины лэмбовского сдвига.

Позже Фейнман, Швингер и Томонага устранили несогласованности в методе Бете. Они показали, что в полной теории, последовательно включающей в себя квантовую механику и теорию относительности, на каждом этапе расчета вклад «хвоста», то есть самых высокоэнергетичных виртуальных пар, в окончательное значение измеряемой в эксперименте характеристики оказывается исчезающе малым. Предсказания созданной на основе их подхода объединенной теории находятся в прекрасном согласии с измеренными в экспериментах значениями лэмбовского сдвига, более того, на сегодняшний день это один из лучших примеров согласия теоретических и экспериментальных результатов за всю историю физики! Но своей ранней работой Бете подтвердил то, что все уже давно знали о нем: он был «плоть от плоти физики». Он хитроумно использовал имеющиеся под рукой инструменты для получения результатов. В духе концепции сферического коня в вакууме он смело отбросил все лишнее, по его мнению, детали, связанные с виртуальными процессами, и проложил тропу, по которой его последователи прошли к современной квантовой теории поля. Эта теория стала фундаментом современной физики элементарных частиц, и я еще вернусь к ней в заключительной главе моей книги.

Итак, мы прошли путь от сферических коней в вакууме до солнечных нейтрино, после чего обратили свой взор на взрывающиеся звезды и расширение Вселенной и, наконец, закончили наш путь на Шелтер Айленде. Красная нить, проходящая через все эти вещи, соединяет всех физиков, независимо от их специализации. При взгляде сверху мир на поверхности представляется очень сложным. Где-то очень

глубоко под этой поверхностью, как мы надеемся, существуют простые правила, управляющие этим миром. Одна из важнейших целей физики — выкопать эти правила. Единственная возможность сделать это — максимально сузить ареал поиска путем упрощения модели и отбрасывания несущественных деталей. Если мы не будем представлять коня в виде сферы, помещать сложную машину в черный ящик, выбрасывать бесконечное количество виртуальных частиц, а вместо этого попробуем понять все сразу, мы не поймем ничего. Мы можем либо сидеть и ждать, что на нас снизойдет откровение, либо идти вперед, не обращая внимания на препятствия и второстепенные детали, сводя проблему к тем задачам, которые мы уже умеем решать, — и только так можно совершить очередной прорыв в науке.

Глава 2

ИСКУССТВО ЧИСЕЛ

Физика отличается от математики,
как секс от мастурбации.

Ричард Фейнман

Язык — это человеческое изобретение, которое является зеркалом души. Именно посредством языка хороший роман, пьеса или стихотворение учат нас быть людьми. С другой стороны, математика — это язык природы, который служит зеркалом физического мира. Это точный, чистый, развитый и строгий язык. Несмотря на то что эти качества делают язык математики идеальным для описания явлений природы, они же делают его непригодным для отражения сугубо человеческих проблем и страданий. Так возникает центральная дилемма «двух культур».

Нравится нам это или нет, но числа являются главными действующими лицами физической драмы. Все, что мы делаем в физике, в том числе все, что мы думаем о физическом мире, в конечном итоге сводится к числам. Причем характер наших

размышлений об этих числах полностью определяется тем, откуда они берутся. Таким образом, физики и математики думают о числах принципиально разными способами. В отличие от математиков, физики используют числа в дополнение к своей физической интуиции, а не вместо нее. Математики же занимаются абстрактными структурами, и их совершенно не волнует, могут ли придуманные ими математические объекты существовать в природе. Для математика число существует само по себе, как отдельная реальность, в то время как для физика оно, как правило, не имеет смысла в отрыве от физического мира.

Числа в физике несут на себе багаж связей с измеряемыми физическими величинами. А любой путешественник знает, что багаж имеет как плохую, так и хорошую сторону. С одной стороны, багаж тяжело тащить, его могут украсть, за него приходится дополнительно платить. С другой стороны, в багаже мы возим множество полезных вещей, необходимых нам в путешествии. С одной стороны, багаж сковывает вашу свободу передвижения, с другой — освобождает от необходимости стирать белье каждый день. Точно так же и числа: с одной стороны, они умирят нашу фантазию, ограничивая ее жесткими математическими рамками, с другой — являются неотъемлемым атрибутом упрощения картины мира. Числа освобождают нас от груза несущественных деталей, показывая, что мы можем игнорировать, а что нет.

То, что я сказал, находится в прямом противоречии с преобладающим мнением, что числа и математические соотношения только усложняют понимание и их следует избегать любой ценой, даже в научно-популярных книгах. Стивен Хокинг в своей «Краткой истории времени» заявил, что каждое уравнение в популярной книге сокращает количество продаж вдвое. Выбирая между количествен-

ным и качественным объяснением какого-нибудь явления, большинство людей, вероятно, предпочтут второе. Мне представляется, что главная причина общего отвращения к математике лежит в области социологии. Математическая безграмотность в нашем обществе возводится едва ли не в достоинство — неспособность сложить пять чисел, чтобы проверить правильность счета в ресторане, считается проявлением человечности, а не глупости. Но я считаю, что корни этого явления в том, что в начальной школе детям не показывают, что стоит за тем или иным числом, и числа представляются им не столь важными в повседневной жизни, как слова.

Я, помню, был поражен, когда несколько лет назад, читая курс физики для нефизиков в Йельском университете — храме литературной грамотности, — обнаружил, что 35 % студентов, в числе которых были выпускники исторических и социологических факультетов, не могли назвать даже порядок величины населения Соединенных Штатов! Многие думали, что в США проживает от одного до десяти миллионов человек — меньше, чем в одном только Нью-Йорке.

На мой взгляд, это признак глубоких проблем в нашей национальной системе образования. И дело даже не в том, что, живя рядом с Нью-Йорком, люди не отдают себе отчета в том, что население всей Америки не может быть меньше населения одного Нью-Йорка. И даже не в непонимании того, что страна с населением 1 миллион человек будет радикально отличаться от страны с населением 100 миллионов. Главная проблема в том, что для большинства из этих студентов такие числа, как 1 миллион или 100 миллионов не имели никакого объективного смысла. Они никогда не пытались сопоставить, например, миллион чашек кофе с количеством людей, которые их выпивают

утром в миллионном городе. Многие не могли назвать мне даже приблизительно расстояние от восточного до западного побережья Соединенных Штатов — они не умели заставить свой мозг сделать простейшую прикидку: умножить расстояние, которое они проезжают за день на автомобиле (около 800 километров) на число дней (5–6 дней), которое необходимо, чтобы пересечь Американский континент, и понять, что это расстояние ближе к 4000–5000 километрам, нежели к 10 000 или к 20 000.

Размышления о числах в терминах того, что эти числа представляют, — самое захватывающее из всех занятий. Именно на этом специализируются физики. Я не возьмусь утверждать, что математические размышления доставляют чувство какого-нибудь особенного комфорта или являются магическим лекарством от математического бессилия, но играть с числами, выясняя, откуда то или иное число появилось в нашем мире и что за ним стоит, достаточно интересно, очень полезно и совсем не сложно. По крайней мере, необходимо научиться оценивать порядок физических величин, а это уже позволит делать важные выводы, не проводя точного количественного анализа. В этой главе я нарушу максимуму Стивена Хокинга, очень надеюсь, что не разорю своего издателя, и покажу, как физики манипулируют числами, чтобы сделать задачу более понятной, почему они делают это именно так, а не иначе, и что они ожидают получить от этого занятия. Основную идею можно сформулировать так: «мы используем числа, чтобы сделать вещи не сложнее, чем они должны быть».

Прежде всего следует отметить, что физические явления охватывают чрезвычайно широкий спектр возможных числовых значений и очень большие или очень маленькие числа могут появляться при решении даже простейших

задач. Самое трудное при работе с такими числами — это подтвердит любой, кто хотя бы раз пытался перемножить столбиком два восьмизначных числа, — не запутаться в количестве цифр. К сожалению, часто самые трудные вещи являются одновременно и самыми важными, поскольку количество цифр определяет *порядок* числа. Допустим, мы умножаем 40 на 40. Какой ответ будет ближе к правильному: 160 или 2000? Ни одно из этих чисел не является точным значением произведения, но второе гораздо ближе к правильному ответу 1600. Если бы работодатель, пообещав платить вам по 40 долларов в час, заплатил за 40 часов работы только 160 долларов, тот факт, что он потерял всего лишь один нолик, был бы для вас слабым утешением, не правда ли?

Чтобы избежать подобных ошибок, физики придумали разделять числа на две части, одна из которых сообщает вам порядок числа, а вторая — точное значение в пределах этого порядка. Такая запись числа называется *экспоненциальной*. Она позволяет избежать записи огромного количества нулей, когда необходимо выразить в привычных нам единицах такие значения, как, например, размер наблюдаемой части Вселенной, составляющий около

1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 сантиметров.

Глядя на это число, любой скажет, что оно очень велико, но насколько велико?

В экспоненциальной нотации используются степени числа 10. Запись 10^n означает число, начинающееся с единицы, за которой следуют n нулей. Например, число 100 в экспоненциальной нотации записывается как 10^2 , а запись 10^6 представляет число, начинающееся с единицы, за которой следуют шесть нулей, то есть один миллион. Оценивая вели-

чину таких чисел, достаточно помнить, что, скажем, число 10^6 содержит в своей записи на один ноль больше, чем число 10^5 , и, следовательно, оно больше него в 10 раз. Для очень маленьких чисел, таких как размер атома, выраженный в сантиметрах — около 0,000000001 см, — ученые используют отрицательные показатели степени. Запись 10^{-n} означает единицу, деленную на 10^n , то есть число типа 0,000 ... 0001, где единица стоит на n -й позиции после запятой. Таким образом, одна десятая будет записана как 10^{-1} , а одна миллиардная — как 10^{-9} .

Любое произвольное числовое значение может быть записано как число в диапазоне от 1 до 10, умноженное на десять в какой-то степени. Число 100 записывается как 10^2 , в то время как число 135 можно представить в виде произведения $1,35 \cdot 100$ и в экспоненциальной нотации записать как $1,35 \cdot 10^2$. Второй сомножитель в этой записи называется *порядком* числа, он дает нам представление о количестве цифр в обычной записи. Таким образом, числа 100 и 135 имеют один и тот же порядок. Первый сомножитель называется *мантиссой* — он говорит нам о том, где именно находится число в пределах указанного порядка, то есть является оно, например, числом 100 или числом 135.

Для физика порядок числа является наиболее важной характеристикой, поскольку он показывает масштаб явления, и экспоненциальная запись в этом отношении очень удобна, не говоря уже о том, что она просто короче. Гораздо легче воспринять число в форме $1,45962 \cdot 10^{13}$, чем 1 459 620 000 000 или «один триллион четыреста пятьдесят девять миллиардов шестьсот двадцать миллионов». Я рискну сделать еще более сильное утверждение: числа, представляющие физический мир, имеют смысл только тогда, когда они записаны в экспоненциальной форме.

Есть и другие несомненные преимущества экспоненциальной записи. В частности, она сильно упрощает манипуляции с числами. Например, вы хотите перемножить два числа, скажем, 100 и 100. Традиционная запись выглядит так: $100 \times 100 = 10\,000$. В экспоненциальной форме нахождение произведения 100×100 сведется к следующей манипуляции: $10^2 \times 10^2 = 10^{(2+2)} = 10^4$ — фактически, мы заменяем умножение сложением. Аналогично и с операцией деления — вместо $1000 : 100 = 10$ мы пишем: $10^3 : 10^2 = 10^{(3-2)} = 10^1$. Деление заменяется вычитанием. Эти простые правила оперирования со степенями десяти избавляют нас от необходимости постоянно считать количество знаков в перемножаемых числах, и единственное, для чего вам может понадобиться калькулятор, это для перемножения мантисс, то есть левых частей в экспоненциальной записи. Но поскольку мантиссы находятся в диапазоне от 1 до 10, то, помня таблицу умножения 10×10 , вы всегда сможете сделать грубую прикидку результата в уме.

В мои задачи не входит научить вас искусству устного счета, вместо этого я расскажу, как производить численные оценки. Если упрощение картины мира предполагает приближенное ее описание, то экспоненциальная форма представления чисел лучше всего подходит для приблизительной оценки каких-то величин с точностью до порядка. Она позволяет быстро получить ответы на вопросы, которые при другом подходе были бы практически неразрешимыми. Грубые оценки помогают убедиться, что мы находимся на правильном пути. Они также позволяют сберечь время и силы, оберегая нас от выполнения ненужной работы. Одна известная байка рассказывает о некоем аспиранте, который потратил массу усилий, чтобы решить сложную систему уравнений, описывающую эволюцию Вселенной, чтобы получить в итоге один важный параметр. И на защите диссертации выяс-

нилось, что этот же параметр получается за пару минут из общих соображений путем простой оценки.

Как сказал Энрико Ферми, «оценка по порядку величины позволяет вам ощутить почву под ногами». Ферми был последним из величайших физиков, который одинаково хорошо владел как теорией, так и техникой эксперимента. Он был одним из участников Манхэттенского проекта по созданию атомной бомбы и в числе прочего занимался проблемой получения управляемой цепной реакции деления атомных ядер. Он также был первым физиком, сумевшим построить теорию, описывающую цепную реакцию деления, за что удостоился Нобелевской премии. Его преждевременная смерть от рака, скорее всего, была вызвана воздействием радиации, изучением которой он занимался в те времена, когда ее опасность для человеческого организма еще не была установлена. Если когда-нибудь вы окажетесь в международном аэропорту имени Логана в Бостоне и по пути в город застрянете в пробке перед въездом в туннель, обратите внимание на мемориальную доску перед выездом на небольшой путепровод. Этот путепровод назван именем Энрико Ферми, и, на мой взгляд, очень показательно, что в то время как города называются именами президентов, а стадионы — именами спортсменов, именем Ферми названа дорога, поскольку в физике он был первопроходцем.

Я упомянул Ферми, потому что, будучи лидером группы физиков, работавших над Манхэттенским проектом в подвальной лаборатории, располагавшейся под футбольным полем Чикагского университета, он постоянно поднимал моральный дух руководимой им группы, разбавляя рутинную и тяжелую работу интересными задачами, далеко не всегда имевшими отношение к физике. Энрико считал, что настоящий физик должен быть способен ответить на любой вопрос

из любой области. Это не обязательно должен быть точный ответ — важно лишь разработать алгоритм, который позволил бы на основе имеющихся общих знаний оценить порядок величины. В качестве примера такой задачи можно привести вопрос, который часто задают на собеседовании в IT-компаниях: «Сколько настройщиков фортепиано проживают в настоящее время в Чикаго?»

Как бы подошел к ответу на этот вопрос Энрико Ферми? Для начала он оценил бы численность населения Чикаго — допустим, пять миллионов человек. Из скольких человек состоит средняя чикагская семья? Предположим, что из четырех. Тогда получается, что в Чикаго проживает (по порядку величины) около одного миллиона, или 10^6 семей. У какой части семей дома есть фортепиано? Допустим, у каждой десятой. Значит, в Чикаго ориентировочно 100 000 фортепиано. Как часто необходимо их настраивать? Пускай раз в год. Сколько времени тратит настройщик на настройку одного инструмента? Явно не менее половины рабочего дня. Тогда, учитывая, что в выходные настройщик отдыхает, получится, что он способен настроить 500 фортепиано в год. Для того чтобы в течение года настроить 100 000 инструментов, понадобится:

$$\begin{aligned} 100\,000/500 &= 1/5 \cdot 10^5/10^2 = 1/5 \cdot 10^3 = 0,2 \cdot 10^3 = 2 \cdot 10^2 = \\ &= 200 \text{ настройщиков.} \end{aligned}$$

Полученный результат не означает, что количество настройщиков в Чикаго в точности равно 200. Это оценка, полученная из общих соображений, но она дает нам представление о порядке величины количества настройщиков. Если бы в реальности их оказалось менее 100 или более 1000, мы были бы сильно удивлены (на самом деле в Чикаго 600 настройщиков). Задумайтесь о том, что мы получили близкую

к реальности оценку практически из ничего, из самых общих соображений, и снимите шляпу перед мощью этого метода.

Оценка по порядку величины может натолкнуть вас на новые идеи, которые в противном случае, возможно, никогда не пришли бы вам в голову. Чего больше: песчинок на пляже или звезд на небе? Сколько людей на Земле чихают в течение одной секунды? За какое время вода и ветер смогут сточить до основания Эверест? Сколько человек в мире... (*придумайте сами подходящий вопрос*) за то время, пока вы читали эти строки?

Не менее важно и то, что оценка по порядку величины может принести вам озарение относительно тех вещей, суть которых вы пытаетесь понять. Человеческий мозг без специальной тренировки способен одновременно визуально зафиксировать в памяти не более двенадцати предметов, а чаще всего — не более шести. Когда вы видите шесть точек на грани игральной кости, вам нет необходимости их пересчитывать, вы и так понимаете, что их шесть. Но если бы у вас оказалась игральная кость с 20 гранями, то вы не сумели бы сразу определить, сколько точек находится на обращенной к вам грани: 17, 19 или 20, не пересчитывая их.

Даже если бы эти точки были нанесены в виде какого-нибудь регулярного узора, вы все равно не смогли бы оценить их общее число, вместо этого вы оперировали бы, например, числом строк (4) и числом столбцов (5). Это происходит потому, что человек не способен легко и интуитивно представить себе число 20, несмотря на то что в повседневной жизни это число встречается достаточно часто: 20 пальцев на руках и ногах или 20 рабочих дней в месяце и т. д.

Оперируя очень большими или очень малыми числами, мы лишены способа наглядно представить, что они означают,

не прибегая к оценке, которая позволила бы сопоставить исследуемое число с чем-то известным, что отличается от него не более чем в несколько раз, то есть с чем-то сравнимым по порядку величины. Один миллион может по порядку величины соответствовать числу людей, живущих в вашем городе, или количеству секунд, которые проходят за 10 дней. Миллиард по порядку величины соответствует населению Китая или количеству секунд, проходящих за 32 года. Можете ли вы оценить, сколько раз вы слышите свое имя за время вашей жизни? Сколько килограммов пищи вы съедаете за десять лет? Удовольствие, получаемое от возможности шаг за шагом решать сложные, на первый взгляд, неразрешимые задачи, со временем вызывает сильное привыкание. Я думаю, что «кайф» подобного рода представляет собой большую часть удовольствия, которую получают физики от занятия физикой.

Экспоненциальная запись и оценка по порядку величины играют в физике неоценимую роль. Именно они в первую очередь и позволяют производить те самые упрощения, о которых я говорил в предыдущей главе. Если мы правильно представляем себе порядок величины, то мы уже понимаем большую часть из того, что нам необходимо понять. Я не хочу сказать, что вычисление всяких коэффициентов, входящих в уравнения типа 2π или $8/3$, не важно, просто оценка порядка величины — это та самая лакмусовая бумажка, которая говорит, что мы на верном пути, а уже точно зная направление, можно начинать улучшать оценки, сравнивать предсказания с экспериментами и наблюдениями и совершенствовать теорию.

Теперь настало время пояснить, почему я сказал, что числа, отображающие реальные вещи в реальном мире, имеют смысл только будучи записанными в экспоненциальной

форме. В первую очередь, потому что числа в физике, как правило, отражают то, что может быть измерено. Измеряя расстояние от Земли до Солнца, я могу выразить полученный результат двумя способами: 14 960 000 000 000 см или $1,4960 \cdot 10^{13}$ см. Для математика обе формы записи эквивалентны и представляют одно и то же число. Но для физика между числами 14 960 000 000 000 и $1,4960 \cdot 10^{13}$ существует принципиальная разница. Когда физик говорит, что расстояние от Земли до Солнца составляет 14 960 000 000 000 сантиметров, это означает, что оно в точности равно этому числу: не 14 959 790 562 739 и даже не 14 960 000 000 001 см, а ровно 14 960 000 000 000 см. Но это также означает, что мы знаем расстояние от Земли до Солнца с точностью до сантиметра!

Но это же абсурд, потому что расстояния от Аспена до Солнца (в полдень) и от Кливленда до Солнца (тоже в полдень) различаются на два с половиной километра — 250 000 сантиметров — из-за того, что Аспен и Кливленд располагаются на разной высоте над уровнем моря. Чтобы такое точное расстояние имело физический смысл, мы должны очень точно указать точку на поверхности Земли, в которой мы производим измерения. Даже если мы будем измерять расстояние между центром Земли и центром Солнца (самый разумный выбор), то это подразумевает, что мы предварительно измерили диаметры Земли и Солнца с точностью до сантиметра, не говоря уже о том, что произвести на практике измерения астрономических расстояний с такой точностью крайне проблематично, если вообще возможно.

Очевидно, что, написав число 14 960 000 000 000, мы на самом деле имели в виду приблизительное, а не точное значение. Но с какой точностью мы на самом деле знаем расстояние от Земли до Солнца? Подобного вопроса не воз-

никает, когда мы записываем число в виде $1,4960 \cdot 10^{13}$ см. Принято считать, что в экспоненциальной записи в мантиссе сохраняются только достоверные цифры, и данная запись говорит о том, что реальное расстояние лежит в пределах между $1,49595 \cdot 10^{13}$ см и $1,49605 \cdot 10^{13}$ см. Если бы расстояние было известно нам с вдесятеро лучшей точностью, мы записали бы его в виде: $1,49600 \cdot 10^{13}$ см.

Таким образом, существует огромная разница между $1,4960 \cdot 10^{13}$ см и $14\,960\,000\,000\,000$ см. Чтобы представить, насколько она огромна, подсчитаем абсолютную погрешность приведенного числа. Эта погрешность составляет $0,0001 \cdot 10^{13}$ см — один миллиард сантиметров, или десять тысяч километров, — почти диаметр Земли!

«И это физики называют точным результатом?» — спросите вы. Да. Несмотря на то что абсолютная величина погрешности — миллиард сантиметров — выглядит чудовищной, она составляет меньше одной десяти тысячной расстояния от Земли до Солнца. Если бы вы с такой же точностью измерили свой рост, вы узнали бы его с точностью до двух десятых долей миллиметра.

Красота записи $1,4960 \cdot 10^{13}$ состоит еще и в том, что множитель 10^{13} сразу же задает «масштаб» числа, а мантисса $1,4960$ указывает на его точность. Чем больше десятичных разрядов содержит мантисса, тем точнее мы знаем физическую величину. Глядя на число, записанное в экспоненциальной форме, вы сразу же понимаете, чем можно пренебречь. Масштаб 10^{13} см говорит, что физические эффекты, проявляющиеся на масштабах в несколько сантиметров, метров, километров и даже тысяч километров, скорее всего, можно не учитывать. А как я говорил в предыдущей главе, самое главное в физике — это понимать, чем можно, а чем нельзя пренебречь.

До сих пор я игнорировал, возможно, наиболее важный факт, который придает числу $1,4960 \cdot 10^{13}$ см физический смысл. Это записанное после него сокращение «см». Без этих «см» мы бы не знали, к какой физической величине относится число, а сакраментальное «см» говорит о том, что это расстояние. Данная спецификация называется *размерностью* физической величины. Размерность связывает абстрактные математические числа с физическим миром реальных явлений. Сантиметры, дюймы, километры, световые года — это все размерности длины, которые могут использоваться для измерения расстояний.

Вероятно, самым удивительным свойством окружающего мира, позволяющим упростить его картину, является то, что в природе существуют только три независимые размерные величины: длина, время и масса¹. Размерности всех остальных величин могут быть выражены через комбинацию трех основных. Неважно, измеряете ли вы скорость в милях в час, метрах в секунду или стадиях в неделю, — все это лишь различные способы выражения расстояния, деленного на время.

Это свойство имеет замечательные последствия. Из-за того что в природе существуют только три независимые размерные величины, количество комбинаций, которые можно из них сконструировать, ограничено. Это означает, что каждая физическая величина связана с любой другой физической величиной некоторым простым способом, и это существенно ограничивает количество различных математических соотношений, возможных в физике. Не побоюсь утверждать, что не существует более важного инструмента, используе-

¹ Некоторые добавляют к трем основным размерностям еще электрический заряд, но в этом нет необходимости. Размерность заряда может быть выражена через размерности длины, времени и массы.

мого физиками, чем размерности физических величин. Размерности не только облегчают запоминание уравнений, но и существенно упрощают картину физического мира. Как я покажу позже, анализ размерностей дает важный ориентир для разумной интерпретации той информации, которую мы получаем от наших органов чувств или измерительных приборов. Описывая физические величины, мы оперируем их размерностями.

Когда мы анализировали законы масштабирования сферического коня, мы работали с соотношениями размерностей длины и массы. Например, нам было важно установить, как соотносится изменение объема коня с изменением его линейных размеров. Анализируя размерности, можно пойти дальше, чтобы понять, как оценить объем предмета произвольной формы. Как я уже говорил, неважно, какими единицами мы пользуемся для измерения объема: кубическими дюймами, кубическими сантиметрами или кубическими футами, важно лишь, что все эти единицы *кубические*. Единицы, в которых измеряется объем, имеют размерность кубической длины, то есть [длина] × [длина] × [длина]. Таким образом, объем любого объекта может быть оценен путем выбора некоторой характеризующей этот объект длины d с последующим возведением ее в куб: d^3 . Обычно этого достаточно, чтобы оценить порядок величины объема. Например, объем сферы задается выражением $V = \pi/6 \cdot d^3 \approx 1/2 \cdot d^3$, где d — ее диаметр.

А вот пример простейшего анализа размерностей. Предположим, что вы забыли, что следует сделать, чтобы найти пройденное телом расстояние: умножить скорость на время или разделить. Посмотрев на размерности входящих в формулу величин, вы мгновенно получите правильный ответ. Размерность скорости — [метр]/[секунда], размер-

ность длины — [метр]. Для того чтобы получить расстояние, то есть [метр], необходимо [метр]/[секунда] умножить на [секунда], а именно скорость умножить на время. Поколение за поколением студентов безуспешно зубрит сложные формулы, вместо того чтобы просто составить входящие в них физические величины так, чтобы размерность справа от знака равенства была такой же, как и размерность слева.

Следует обратить особое внимание на то, что анализ размерности никоим образом не гарантирует, что вы получите правильный ответ, но он гарантированно подскажет, когда вы ошибаетесь. Он как слегка при переходе через болото: не факт, что, пользуясь ею, вы не заблудитесь, но зато наверняка не утонете.

Говорят, что фортуна благоволит подготовленному уму. Ничто не может быть более справедливым в отношении физики, и анализ размерности поможет подготовить ум к неожиданностям. Результат простого анализа размерностей часто оказывается настолько потрясающим, что может показаться магией. Для большей убедительности я приведу пример из современной физики, в котором известное и неизвестное оказались очень тесно переплетены. В этой истории анализ размерностей помог прийти к пониманию одной из четырех фундаментальных сил природы — *сильного* взаимодействия, которое связывает кварки в протоны и нейтроны, являющиеся основными компонентами атомных ядер. При первом чтении апелляция к размерностям может показаться вам не очень понятной, но не беспокойтесь. Я привожу здесь эту историю, потому что она позволяет увидеть, насколько эффективно анализ размерностей способен подтолкнуть физическую интуицию. В моем рассказе красота вывода более важна, чем полученный результат.

Физики, изучающие элементарные частицы, пытающиеся найти основные кирпичи мироздания и объяснить фундаментальные взаимодействия, разработали систему единиц измерения, которая идеально приспособлена для анализа размерностей. В принципе три основные размерности — длина, время и масса — независимы, но на практике между ними есть фундаментальная связь, осуществляемая посредством так называемых фундаментальных физических констант. Например, если бы существовала некая универсальная константа, связывающая время и расстояние, я мог бы выразить расстояние через время путем простого умножения времени на эту константу. Впрочем, почему «если бы»? Такая константа действительно существует — это скорость света в вакууме. Один из постулатов созданной Эйнштейном теории относительности гласит, что скорость света в вакууме не зависит ни от скорости источника света, ни от скорости наблюдателя: как бы мы ее ни измеряли, мы всегда будем получать одно и то же значение — в этом и состоит ее универсальность. Эту константу принято обозначать латинской буквой c , и, как нетрудно догадаться, она имеет размерность длины, деленной на время. Если я умножу некий промежуток времени на c , я получу нечто, имеющее размерность длины, а именно — расстояние, которое свет проходит за это время. Таким способом мы можем любое расстояние выразить через время, которое требуется свету, чтобы пройти это расстояние. Например, расстояние от вашего плеча до локтя свет проходит за 10^{-9} секунды, значит, вы можете считать, что расстояние от плеча до локтя составляет 10^{-9} секунды. Любой наблюдатель, измеряющий расстояние в «световых секундах», получит то же самое значение.

Существование такой универсальной константы, как скорость света, позволяет установить взаимно однозначное

соответствие между расстоянием и временем. Это позволяет исключить одну из этих размерностей из системы единиц. А именно: мы можем либо оставить только единицу длины, а время выражать через нее, либо наоборот. При этом очень удобно выбрать такие единицы измерения времени и расстояния, в которых скорость света оказывается равной единице. Например, мы можем выбрать в качестве единицы длины световую секунду, тогда скорость света будет равна одной световой секунде в секунду. В такой системе единиц расстояние и эквивалентное ему время будут выражаться одним и тем же числом!

Пойдем дальше. Если численное значение световой длины и соответствующего ей светового времени в построенной нами системе единиц одинаковы, то стоит ли рассматривать длину и время как величины разной размерности? Вместо этого можно присвоить расстоянию и времени одинаковые размерности, тогда скорость, которая суть расстояние, деленное на время, станет безразмерной величиной. Физически это эквивалентно тому, что мы бы измеряли скорость в (безразмерных) долях скорости света, то есть если я напишу, что скорость равна $1/2$, это попросту будет означать, что она равна половине скорости света. Очевидно, что для корректного построения подобной системы нам понадобится универсальная эталонная скорость, относительно которой мы будем измерять все остальные скорости, — ну так скорость света и является таким универсальным эталоном.

Итак, после приравнивания скорости света к единице и объявления ее безразмерной величиной у нас остаются только две независимых размерности: время и масса (или, если так будет удобнее, расстояние и масса). Одним из следствий такого необычного подхода является то, что он позволяет, помимо расстояния и времени, приравнять размерности

и других величин. Например, знаменитая формула Эйнштейна $E = mc^2$ устанавливает эквивалентность массы и энергии. В нашей системе единиц, где скорость света c равна безразмерной единице, размерность массы оказывается такой же, как и размерность энергии. Давайте подумаем, что формально делает формула Эйнштейна. Она устанавливает взаимно однозначное соответствие между массой и энергией, то есть если у нас что-то обладает некоей энергией, то это что-то обладает эквивалентной этой энергии массой, и наоборот. Если переводной коэффициент между массой и энергией становится безразмерной единицей, то величина массы становится тождественно равной величине энергии. Это освобождает нас от необходимости использовать для измерения массы величин типа килограмма или фунта, мы можем измерять ее в тех же единицах, в которых измеряем энергию: в джоулях или калориях. Именно так и поступают физики, изучающие элементарные частицы: они измеряют массы частиц в *электронвольтах*. Электронвольт — это энергия, которую приобретает электрон, если его разогнать разностью потенциалов в один вольт. Вместо того чтобы записывать массу электрона как 10^{-31} г, физики записывают ее как 0,511 МэВ (мегаэлектронвольт). Поскольку в физике элементарных частиц ученые постоянно имеют дело с процессами, в которых масса частиц преобразуется в энергию и обратно, то совершенно разумно и логично использовать для измерения массы те же единицы, что и для измерения энергии, и не брать в голову никакие переводные коэффициенты из джоулей в килограммы. Существует важное правило: всегда следует использовать такие единицы измерения, которые дают наилучшее представление о масштабе явления. В ускорителях частицы разгоняются до скоростей, близких к скорости света, поэтому использование системы единиц, в которой скорость света равна единице, для таких задач

очень удобно и практично. Для описания же явлений повседневной жизни такая система, наоборот, оказывается непрактичной и неудобной, поскольку приводит к необходимости оперировать очень маленькими числами. Например, скорость реактивного самолета в единицах скорости света составляет порядка $0,000001 = 10^{-6}$.

Но это еще не все. Существует еще одна фундаментальная физическая постоянная, ее принято обозначать буквой h и называть *постоянной Планка*. Немецкий физик Макс Планк был одним из отцов-основателей квантовой механики. Он ввел эту константу, чтобы связать энергию кванта с его частотой, а значит, постоянная Планка устанавливает связь между энергией и временем или, если вам хочется, между массой и расстоянием. Действуя так же, как мы поступили со скоростью света, примем численное значение постоянной Планка равным безразмерной единице. Что получится? Из всех размерностей у нас останется только размерность энергии, поскольку теперь мы можем выразить через энергетические единицы, например через электронвольты, не только энергию, но и массу, и время, и расстояние — и все остальные физические единицы измерения. Постоянная Планка связывает энергию и частоту: $E = h\nu$, частота имеет размерность [1/секунда], тогда время в энергетических единицах будет иметь размерность [1/электронвольт]. В физике часто вместо постоянной h используется постоянная \hbar , которая равна $h/(2\pi)$, просто потому что так удобнее. В системе единиц, в которой $c = \hbar = 1$, одна секунда будет равна $1,5 \cdot 10^{15}/\text{эВ}$ — обратите внимание, что электронвольты стоят в знаменателе, обычно в таких случаях используют отрицательные показатели степени и пишут: $1,5 \cdot 10^{15} \text{ эВ}^{-1}$.

В итоге мы создали систему, в которой три основные размерности свели к одной. Теперь мы можем описать весь

физический мир, используя только размерность массы, или только размерность длины, или только размерность времени — не принципиально, какую размерность мы выберем, это уже будет результат произвольного соглашения. В физике высоких энергий удобно использовать в качестве базовой размерность энергии. Например, объем, имеющий в привычной системе единиц размерность [длина³], в новой системе, в которой $c = \hbar = 1$, будет иметь размерность [1/энергия³], потому что длина в этой системе имеет ту же размерность, что и время, а время имеет размерность, обратную размерности энергии. Численно 1 м^3 будет равен $1,3 \cdot 10^{20} \text{ эВ}^{-3}$.

На первый взгляд описанный подход выглядит непривычно, но вся его прелесть состоит в том, что, оставляя только один независимый размерный параметр, мы можем существенно упростить анализ и свести очень сложные явления к одной физической величине. Порой это выглядит как настоящая магия. Например, предположим, что мы обнаружили новую элементарную частицу, масса которой в три раза превышает массу протона, или в энергетических единицах составляет около 3 миллиардов электронвольт — 3 ГэВ (гигаэлектронвольт). Если эта частица нестабильна, то каково ожидаемое время ее жизни? Может показаться, что, не зная никаких подробностей о структуре частицы, сделать подобную оценку невозможно. Однако, используя анализ размерностей, можно выдвинуть кое-какие предположения.

Единственная размерная характеристика, присутствующая в этой задаче, — масса, или, что эквивалентно, энергия покоя частицы. Поскольку размерность времени в нашей новой системе единиц эквивалентна обратной размерности массы, разумная оценка времени жизни частицы будет составлять $k/(3 \text{ ГэВ})$, где k — некий безразмерный параметр.

В отсутствие какой бы то ни было дополнительной информации нам не остается ничего лучшего, как надеяться, что этот параметр не очень сильно отличается от единицы. Мы можем перевести электронвольты в привычные секунды, используя соотношение: $1/1 \text{ эВ} = 6,5 \cdot 10^{-16} \text{ с}$. Таким образом, время жизни нашей новой частицы должно быть порядка $k \cdot 10^{-25}$ секунды.

Разумеется, в действительности никакой магии тут нет. Мы не получили что-то из ничего, просто анализ размерностей дал характерный масштаб нашей задачи. Этот анализ говорит, что «естественное время жизни» нестабильной частицы такой массы составляет порядка $k \cdot 10^{-25}$ секунды, подобно тому как «естественное время жизни» человека составляет порядка $k \cdot 75$ лет. Все реальные физические (или в последнем случае биологические) оценки содержат неизвестный параметр k . Если вдруг этот параметр оказывается очень малым или очень большим, то перед нами встает новая интересная задача: понять, почему в каком-то конкретном случае параметр существенно отличается от единицы.

Анализ размерностей дает нам очень важную информацию для размышлений. Если параметр k сильно отличается от единицы, это говорит о том, что за кулисами действует какая-то дополнительная сила — очень слабая или, наоборот, очень сильная, приводящая к тому, что реальное время жизни начинает отличаться от естественного, получаемого путем анализа размерностей. Допустим, мы обнаружили суперконя, размеры которого в 10 раз превышают размеры обычного коня, а вес составляет всего полкилограмма. Из приведенных ранее масштабных соображений суперконь должен весить в 1000 раз больше обычного коня, значит, — заключаем мы, — наблюдаемый сверхлегкий суперконь состоит из очень экзотического вещества. И правда — многие из

наиболее интересных физических открытий были сделаны в результате обнаружения несоответствия между наблюдаемыми фактами и результатами простой экстраполяции явлений на другие масштабы. Важно понимать, что, не обнаружив мы этого несоответствия, мы бы, возможно, не имели ни малейшего понятия о том, что тут можно найти что-то новое и интересное!

В 1974 году произошло одно знаменательное и драматическое событие. В течение 1950-х и 1960-х годов энергии, до которых разгонялись частицы в ускорителях, неуклонно росли. Помимо энергий росло и количество одновременно ускоряемых частиц, что позволило перейти от столкновений частиц с неподвижной мишенью к столкновениям встречных пучков, а это, в свою очередь, дополнительно увеличило энергии сталкивающихся частиц.

В ходе этих экспериментов было обнаружено множество неизвестных ранее типов частиц. Когда количество новых частиц перевалило за сотню, теоретики схватились за голову, но в начале 1960-х годов Мюррей Гелл-Ман в Калтехе разработал *кварковую модель*, позволившую навести некоторый порядок в открытом экспериментаторами хаосе. Согласно его предположению, все вновь открытые частицы можно составить из простых комбинаций фундаментальных объектов, которые Гелл-Ман назвал *кварками*. Частицы, получаемые в ускорителях, можно было разделить на состоящие из трех кварков и на состоящие из кварка и антикварка. Новые комбинации, составленные из того же набора кварков, из которых состоят протон и нейтрон, согласно предсказаниям должны были образовывать нестабильные частицы с массами порядка массы протона. Таки частицы были действительно обнаружены, и их время жизни оказалось довольно близким к нашей оценке — 10^{-24} секунды.

Наша оценка была 10^{-25} секунды, значит, константа k составляет около 10 — не слишком далеко от единицы. Все, казалось бы, хорошо, но оставались две неприятности. Во-первых, при распаде частиц всегда образовывались другие частицы, состоящие из кварков, но ни разу ни в одном процессе никому не удалось получить один свободный кварк, а во-вторых, из-за того, что силы взаимодействия между кварками были велики, никому не удавалось точно рассчитать, как они должны себя вести.

В 1973 году было сделано важное теоретическое открытие. Работая над теорией, которая позволила бы объединить электромагнитное и слабое взаимодействие, Дэвид Гросс и Фрэнк Вильчек из Принстона и независимо от них Дэвид Политцер из Гарварда разработали очень привлекательную теорию, которая претендовала на роль теории сильного взаимодействия. В этой теории каждый кварк мог иметь одно из трех различных свойств, которые были в рабочем порядке условно названы «цветами», а сама теория получила название *квантовой хромодинамики*, или сокращенно КХД. Самым удивительным свойством взаимодействия между кварками оказалось то, что, когда они приближались друг к другу, сила притяжения между ними уменьшалась, а когда удалялись — увеличивалась. До сих пор ни в одной теории сила взаимодействия не вела себя таким странным образом.

Наконец появилась надежда, что кто-нибудь сумеет выполнить расчеты, на основании которых можно будет сравнить предсказания теории с экспериментом. Поскольку на близких расстояниях силы взаимодействия между кварками малы, то можно начать расчет с невзаимодействующих кварков, а потом добавлять методом последовательных приближений все более и более сильные взаимодействия и в конце получить относительно точное описание их взаимодействия.

В то время как теоретики начали исследовать особенность поведения кварков, получившую название *асимптотической свободы*, экспериментаторы из Нью-Йорка и Калифорнии разгоняли частицы в ускорителях до все более и более высоких энергий.

И вот в ноябре 1974 года, с разницей в несколько недель, две разные группы экспериментаторов обнаружили новую частицу с массой примерно в три раза больше массы протона. Но привлекла к себе внимание частица не своей массой, а необычно большим временем жизни, которое в 100 раз превышало время жизни других частиц с похожими массами. Один из физиков сравнил этот факт с обнаружением затерянного в джунглях племени людей, продолжительность жизни в котором составляет 10 000 лет.

Пытаясь объяснить этот феномен, Политцер и его коллега Том Эпплакуист пришли к выводу, что обнаруженная тяжелая частица состоит из нового типа кварков, предсказанных теоретически несколькими годами ранее и названных *очарованными* кварками. Большое время жизни связанного состояния этих кварков напрямую следовало из асимптотической свободы кварков в КХД. Если очарованный кварк и очарованный антикварк тяжелее кварков, из которых состоят протоны и нейтроны, то в связанном состоянии они находятся гораздо ближе друг к другу, а значит, силы взаимодействия между ними гораздо слабее.

Это приводит к тому, что им требуется большее время, чтобы «найти» друг друга и проаннигилировать. Грубая оценка времени жизни такого связанного состояния была получена путем масштабирования силы взаимодействия кварков от размера протона до предполагаемого размера новой частицы. Оценка по порядку величины совпала с эксперимен-

тальными данными. Так КХД получила свое первое экспериментальное подтверждение.

В последующие годы эксперименты, проведенные при еще более высоких энергиях сталкивающихся частиц, показали, что используемое в расчетах приближение является достаточно надежным, и многократно подтвердили существование предсказанной квантовой хромодинамикой асимптотической свободы. Несмотря на то что до сих пор никому так и не удалось выполнить полный и точный расчет поведения кварков на таких расстояниях, когда их взаимодействие становится очень сильным, количество полученных экспериментальных доказательств уже настолько велико, что сегодня никто не сомневается в справедливости КХД. В 2004 году Гросс, Вильчек и Политцер были удостоены Нобелевской премии за предсказание асимптотической свободы, открывшей дорогу к экспериментальной проверке квантовой хромодинамики. Без ключевых соображений, основанных на анализе размерностей физических величин, это открытие, вполне возможно, могло и не состояться или, по крайней мере, задержаться на долгие годы. Анализ размерностей применим не только в физике элементарных частиц, он является универсальным методом, который дает нам точку опоры, позволяющую протестировать наше представление о реальности.

Хотя физическое мировоззрение и начинается с чисел, используемых для описания природы, оно не останавливается на них. Помимо чисел физикам нужен язык, при помощи которого они могли бы оперировать числами, как словами, и этим языком является математика. Сразу предвижу чисто практический вопрос: почему бы не пользоваться более естественным языком? Но у нас нет выбора. Еще Галилей 400 лет назад писал: «Философия написана в величественной

книге (я имею в виду Вселенную), которая постоянно открыта нашему взору, но понять ее может лишь тот, кто сначала научится постигать ее язык и толковать знаки, которыми она написана. Написана же она на языке математики, и знаки ее — треугольники, круги и другие геометрические фигуры, без которых человек не смог бы понять в ней ни единого слова; без них он был бы обречен блуждать в потемках по лабиринту»¹.

Сегодня утверждение, что математика является языком физики, воспринимается как банальность, наподобие той, что французский язык является языком любви. Но это утверждение никак не объясняет, почему мы не можем перевести на другой язык математические выражения так же легко, как стихи Бодлера. В вопросах любви даже те из нас, чей родной язык не является французским, разбираются достаточно хорошо и без перевода, чего нельзя сказать о математических вычислениях.

Дело в том, что математика — это больше, чем просто язык. Чтобы показать, насколько больше, я одолжу один аргумент у Ричарда Фейнмана. Помимо того, что Фейнман был харизматиком, он являлся еще и одним из величайших умов среди физиков-теоретиков двадцатого столетия. Фейнман обладал редким даром просто и понятно объяснять сложные вещи, чем, мне кажется, отчасти объясняется тот факт, что у него всегда был собственный способ понимания и собственный способ вывода почти всех результатов классической физики.

¹ «Il Saggiatore, nel quale con bilancia squisita e giusta si ponderano le cose contenute nella Libra è un trattato scritto da Galileo Galilei», — Roma, 1623. Цитируется по переводу Ю. А. Данилова: Галилео Галилей, Пробирных дел мастер. — М.: Наука, 1987.

Объясняя роль математики в физике¹, он, в свою очередь, приводил в пример Исаака Ньютона. Величайшим открытием Ньютона был, безусловно, закон всемирного тяготения. Показав, что та же сила, которая удерживает нас на поверхности Земли, отвечает за движения всех небесных объектов, Ньютон сделал физику универсальной наукой. Он показал, что у нас есть возможность описать не только управляющие нами законы и наше место во Вселенной, но и саму Вселенную. Мы сегодня склонны принимать это как должное, но один из самых замечательных законов во Вселенной говорит нам, что та же самая сила, которая управляет полетом бейсбольного мяча, управляет движением Земли вокруг Солнца, движением Солнца вокруг центра Галактики, движением Галактики относительно других галактик и эволюцией самой Вселенной, хотя относительно справедливости последнего утверждения — насчет Вселенной — вопрос пока остается открытым.

Ньютоновский закон всемирного тяготения может быть сформулирован в словесной форме: сила гравитационного притяжения между двумя объектами направлена вдоль линии, соединяющей эти объекты, пропорциональна произведению масс объектов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Словесное определение выглядит громоздким, но это не важно. В сочетании со вторым законом Ньютона, утверждающим, что тело реагирует на действующую на него силу путем изменения скорости в направлении действия силы, и это изменение пропорционально величине силы и обратно пропорционально массе тела, закон всемирного тяготения позволяет описать все. Любое движение любого количества тяготеющих тел может быть выведено из этих двух законов. Но как? Я мог бы дать эту формулировку

¹ Фейнман Р. Характер физических законов. — М.: Наука, 1987.

лучшему в мире лингвисту и попросить его вывести из нее возраст Вселенной, используя семантические правила, но подозреваю, Вселенная прекратит свое существование раньше, чем ему удастся получить ответ.

Суть в том, что математика представляет собой набор утверждений и выводов, подчиненных правилам логики. Например, Иоганн Кеплер в начале XVII века, проанализировав множество наблюдательных данных, пришел к выводу, что планеты движутся вокруг Солнца особым образом. Если соединить планету с Солнцем отрезком прямой, то этот отрезок будет за одинаковые промежутки времени «заметать» одинаковые площади. Математически можно показать, что из этого утверждения следует, что, когда планета находится ближе к Солнцу, она движется по своей орбите быстрее, чем когда она находится дальше. Ньютон, в свою очередь, показал, что открытый Кеплером закон может быть строго математически получен из приведенных выше формулировок закона всемирного тяготения и второго закона Ньютона.

Попробуйте, если сумеете, вывести второй закон Кеплера из законов Ньютона, используя только правила английского (или русского) языка... Но при помощи математики, в данном случае на основе простых геометрических соображений, вы сделаете это за несколько минут. За подробностями обратитесь к «Математическим началам натуральной философии» Ньютона, а еще лучше — прочитайте замечательную книгу Фейнмана «Характер физических законов».

Ключевой момент этой истории состоит в том, что Ньютон, возможно, никогда не сумел бы вывести закон всемирного тяготения, если бы не соединил при помощи математики открытый Кеплером закон движения планет с предположе-

нием, что между планетами и Солнцем действует сила притяжения. Этот момент является решающим для развития науки. Не имея математической основы под натуральной философией, к которой во времена Ньютона относили физику, невозможно построить логичную и согласованную теорию. Синтез математических выводов с наблюдаемой физической реальностью имеет основополагающее значение для построения научной картины реальности.

Я думаю, что вполне уместной будет литературная аналогия. Работая над этой главой, я читал роман канадского писателя Робертсона Дэвиса «Пятый персонаж». В нескольких предложениях он кратко суммирует то, что произошло с его персонажем: «Солдаты пришли в крайнее изумление, что я способен на такие вещи, чем привели в крайнее изумление меня самого... В их головах просто не укладывалось, что человек может иметь и другую, вроде бы совсем противоположную грань. Мне кажется, что я всегда считал самоочевидным, что каждый человек имеет по крайней мере две — если не двадцать две — грани...»¹

Позвольте теперь пояснить, к чему я привел эту цитату, на личном примере. Одной из многих вещей, которые я приобрел благодаря своей жене, было открытие новых способов видения мира. Мы вышли из совершенно разных слоев общества. Она родилась в маленьком городке, а я — в мегаполисе. Те, кто, подобно мне, вырос в мегаполисе, склонны воспринимать окружающих не так, как те, кто вырос в небольшом городке. Подавляющее большинство людей, которых вы встречаете ежедневно в большом городе, фигурально выражаясь, «одномерны». Вы воспринимаете мясника как мясника, почтальона как почтальона, врача как врача и так далее. Но в маленьком

¹ Цитируется по переводу М. Пчелинцева: *Робертсон Дэвис. Пятый персонаж.* — СПб.: Азбука-классика, 2001.

городке вам не удастся встретить просто мясника или просто почтальона, потому что все они, помимо всего прочего, еще и ваши соседи. Врач может по совместительству оказаться горьким пьяницей, а живущий напротив бабник — прекрасным учителем английского языка в местной школе. Подобно главному герою романа Дэвиса, я открыл для себя, что люди не могут быть легко классифицированы на основании какой-нибудь одной черты характера или рода занятий. Только когда осознаешь всю многогранность человека, получаешь возможность понять его.

Аналогично, каждый физический процесс во Вселенной — «многомерен». Только охватив взглядом множество, на первый взгляд, различных, а на самом деле эквивалентных описаний какого-нибудь явления, можно понять, «как это работает». Мы не способны понять природу, наблюдая только одну ее сторону. Хорошо это или плохо, но только математические соотношения позволяют нам увидеть целое на фоне частей, увидеть лес за деревьями. Математика позволяет представить сложный мир в виде простого сферического коня.

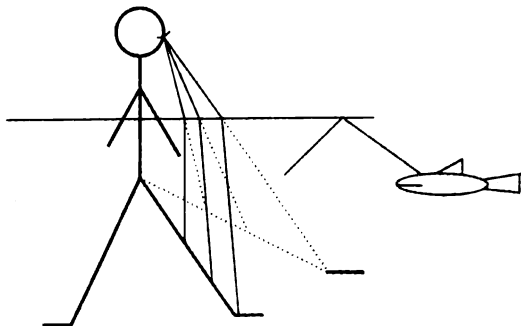
В каком-то смысле математика усложняет мир, открывая нам разные грани реальности. Но, поступая таким образом, она в действительности упрощает его для нашего понимания. Нет необходимости держать в голове одновременно все грани реальности, математика позволяет легко переходить от одной грани к другой. Если роль физики состоит в том, чтобы сделать для нас более понятной природу, то роль математики в том, чтобы сделать для нас более понятной физику.

Позволяя описать одно и то же явление разными способами, математика открывает для нас новые пути исследования природы, позволяя взглянуть на что-то давно известное с новой стороны. Кроме того, каждая новая грань реаль-

ности открывает возможность расширения наших представлений за пределы известного явления, приводя к новым открытиям. Было бы упущением с моей стороны не привести один известный пример, который не перестает восхищать меня вот уже двадцать пять лет, с тех пор, как я впервые узнал его от Фейнмана.

Речь пойдет о таком всем знакомом, но вместе с тем загадочном явлении, как мираж. Любой, кто когда-либо ехал на автомобиле в жаркий день по длинному прямому участку шоссе, наблюдал, как впереди то и дело возникают, а при приближении пропадают лужи, в которых отражается небо и окружающий пейзаж. Это менее экзотический вариант того, что видят бредущие через пустыню путники, бросающиеся к иллюзорному озеру, которое исчезает при их приближении.

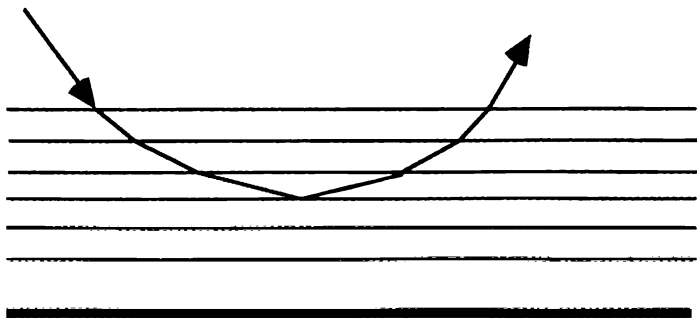
Существует стандартное объяснение возникновения миража, заключающееся в том, что световые лучи преломляются, проходя границу двух сред. Это, в частности, объясняет, почему, стоя в воде, вы выглядите меньше ростом. Лучи света преломляются, пересекая поверхность воды, и вы видите собственные ступни выше, чем они расположены на самом деле:



Когда свет выходит из более плотной среды в менее плотную, как показано на рисунке (проходит путь от ваших ног в воде до ваших глаз в воздухе), он всегда преломляется в сторону более плотной среды. Если угол, под которым свет падает на границу сред, слишком большой, то свет вообще не выходит из более плотной среды, а испытывает полное внутреннее отражение. В результате акула, собирающаяся перекусить вами, оказывается скрытой от вашего взора.

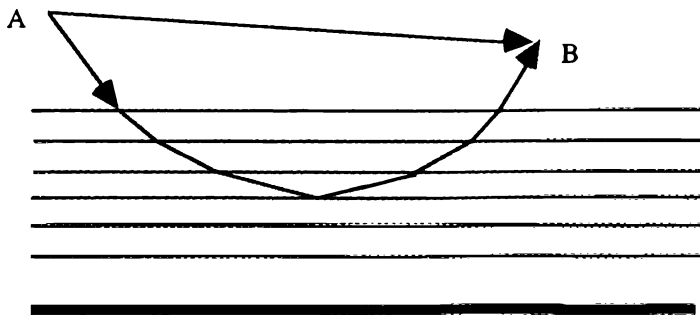
В знойный день воздух над поверхностью дороги сильно нагревается и становится гораздо менее плотным. По мере удаления от разогретого асфальта воздух становится холоднее, и его плотность увеличивается. Когда луч света, приходящего от неба, приближается к поверхности дороги, он попадает во все более и более разреженные слои воздуха и испытывает преломление, отклоняясь в сторону более плотного, то есть холодного воздуха, пока не отразится обратно вверх.

Таким образом, разогретая дорога представляется вам как бы зеркалом, отражающим голубое небо. Если вы внимательно присмотритесь к миражу, то увидите, что это «зеркало» на самом деле расположено не на самой поверхности дороги, а чуть выше нее.



Это стандартное объяснение миража, и оно является вполне удовлетворительным, хотя и не особо вдохновляющим. Но существует другое объяснение того же явления, которое математически эквивалентно первому, но рисует всю картину существенно иначе. Это объяснение основано на *принципе наименьшего времени*, предложенном французским математиком Пьером Ферма в 1650 году, который гласит, что свет всегда распространяется по пути, для прохождения по которому ему требуется минимальное время.

Этот принцип прекрасно объясняет, почему свет в однородной среде распространяется по прямой линии, но как с его помощью объяснить мираж? Допустим, нам известно, что скорость света в менее плотном воздухе больше, чем в более плотном. Поскольку воздух вблизи дороги более горячий и менее плотный, то и свет вблизи дороги движется быстрее, чем вдали от нее. Теперь представьте себе луч света, который собирается попасть из точки А в точку В. Какой путь он выберет, руководствуясь принципом Ферма?



Один из возможных путей — это отрезок прямой линии, соединяющий точки А и В. Однако в этом случае свету при-

дется проделать весь путь в холодном и плотном воздухе. Другой возможный путь показан на рисунке. В этом случае свет проходит большее расстояние, но он проводит большее время в менее плотном воздухе вблизи поверхности дороги, где он движется быстрее. Вычислив общее время, затраченное светом в каждом из двух вариантов, вы обнаружите, что кривой путь оказывается более быстрым, чем прямой.

Если задуматься, то все это очень странно. Откуда свет заранее может знать, какой путь является самым быстрым? Не может же он «обнюхать» все возможные пути, прежде чем окончательно выбрать правильный? Разумеется, нет. Он просто повинуется локальным физическим законам, которые говорят ему, что следует делать в каждый конкретный момент, а математически (после интегрирования) это всегда оказывается путь, требующий минимального времени. В этом выводе есть что-то, вызывающее чувство глубокого удовлетворения. Он кажется более фундаментальным, чем альтернативное описание с позиции преломления света в различных слоях воздуха. Так оно и есть. Теперь мы понимаем, что законы движения любых объектов могут быть выражены в форме, похожей на принцип Ферма. Кроме того, эта новая форма выражения классических ньютоновских законов движения привела Фейнмана к разработке новых методов описания квантово-механического поведения частиц.

Путем предоставления различных, но эквивалентных способов описания мира математика открывает перед нами новые пути понимания природы. Новый способ описания — это больше, чем пересказ другими словами. Новая картина может помочь нам обойти препятствия, которые представлялись непреодолимыми с прежних позиций. Например, методы, основанные на принципе, аналогичном принципу Ферма, позволили применить квантовую механику в таких

областях, в которых она до сих пор считалась неприменимой. В частности, стоит упомянуть недавние попытки Стивена Хокинга понять, может ли квантовая механика привести к переосмыслению общей теории относительности.

Поскольку математические соотношения играют ключевую роль в нашем понимании природы, открывая новые способы описания мира, то неизбежно возникает следующий вопрос, наедине с которым я хочу оставить вас в конце этой главы. Если описание природы является математической абстракцией, то какой смысл имеет утверждение, что мы понимаем Вселенную? Например, в каком смысле законы Ньютона объясняют, почему физические тела движутся? Обратимся снова к Ричарду Фейнману:

Что значит «понять» что-либо? Представьте себе, что сложный строй движущихся объектов, который и есть мир, — это что-то вроде гигантских шахмат, в которые играют боги, а мы следим за их игрой. В чем правила игры, мы не знаем; все, что нам разрешили, — это наблюдать за игрой. Конечно, если посмотреть подольше, то кое-какие правила можно ухватить. Под основными физическими воззрениями, под фундаментальной физикой мы понимаем правила игры. Но, даже зная все правила, можно не понять какого-то хода просто из-за его сложности или ограниченности нашего ума. Тот, кто играет в шахматы, знает, что правила выучить легко, а вот понять ход игрока или выбрать наилучший ход порой очень трудно. Ничуть не лучше, а то и хуже обстоит дело в природе. Не исключено, что в конце концов все правила будут найдены, но пока отнюдь не все они нам известны. То и дело тебя поджидает рокировка или какой-нибудь другой непонятный ход. Но помимо того, что мы не знаем всех правил, лишь очень и очень редко нам удастся действительно объяснить что-либо на их основе. Ведь почти все встречающиеся положения настолько сложны, что нет никакой возможности, заглядывая в правила, проследить за планом игры, а тем более предугадать очередной

ход. Приходится поэтому ограничиваться самыми основными правилами. Когда мы разбираемся в них, то уже считаем, что «поняли» мир¹.

В конце концов, мы никогда не сможем пройти дальше установления каких-то законов и никогда не сможем узнать, почему они именно такие. Но мы успешно открываем эти законы путем вычленения простого из сложного и отбрасывания несущественного, руководствуясь теми правилами, о которых я рассказывал в этой и предыдущей главах. И когда мы пытаемся понять мир тем способом, которым это делают физики, это все, что мы можем надеяться сделать. Тем не менее, если мы очень постараемся и удача окажется на нашей стороне, мы сможем, по крайней мере, получить удовольствие от прогнозирования того, что произойдет в ситуации, которую никто никогда раньше не наблюдал. Поступая таким образом, мы можем надеяться обнаружить новые скрытые физические закономерности, предсказав их при помощи математики, и надо признать, что это делает процесс познания мира чрезвычайно увлекательным занятием.

¹ Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 1, гл. 2. — М.: Мир, 1965.



ЧАСТЬ ВТОРАЯ
.....
ПРОГРЕСС

Глава 3

ТВОРЧЕСКИЙ ПЛАГИАТ

Чем сильнее вещи меняются, тем больше они остаются теми же.

Жан-Батист Альфонс Карр

Бытует расхожее мнение, что в основе новых научных открытий всегда лежат радикально новые идеи. В действительности все обстоит совсем наоборот. Старые идеи не только выживают в научных революциях, но и не теряют своего фундаментообразующего положения.

Несмотря на то что Вселенная бесконечно богата разнообразными явлениями, число основополагающих принципов, управляющих этими явлениями, весьма невелико. В результате в физике ценятся не столько новые, сколько работающие идеи. Таким образом, мы используем одни и те же концепции, один и тот же формализм, одни и те же методы, одни и те же картины мира, приспособлявая и комбинируя их в разных вариантах до тех пор, пока они работают.

Подобный подход к разгадкам тайн природы может показаться робким и не креативным, но это не так. Раз уж у кого-то хватило смелости предположить, что при помощи пращи можно убить гиганта, то кто запрещает нам предполагать, что те же законы, которые управляют полетом камня, выпущенного из пращи, не годятся для описания эволюции Вселенной? Чтобы понять, как использовать старую идею в новой и необычной ситуации, зачастую требуется немалая фантазия.

В физике «меньше» значит «больше». Пересадка старых идей в организм новых теорий столь часто завершается успехом, что мы имеем все основания ожидать, что эта практика будет приносить плоды и в дальнейшем. Даже те редкие новые физические концепции, которые пробили себе путь в науке, обречены на мирное сосуществование с уже имеющимися знаниями. Это тот творческий плагиат, который делает физику простой и понятной, поскольку это означает, что фундаментальных физических принципов очень мало.

Одним из величайших современных заблуждений относительно науки является представление, будто научные революции сметают все, что было прежде. Например, часто приходится слышать, что Эйнштейн опроверг Ньютона. Но это не так. Движение мяча, который я выпускаю из своей руки, описывается и всегда будет описываться законами Ньютона. И никакая научная революция не заставит его падать вверх. Наиважнейшим «законом» физики является требование, чтобы новые теории всегда согласовывались со старыми, чья работоспособность проверена практикой. Поэтому все последующие теории всегда будут активно заимствовать идеи у предыдущих.

Этот метод «делания науки» дополняет метод аппроксимации реальности, о котором я говорил ранее. Фейнмановское

«к черту торпеды, полный вперед!» предполагает, что не обязательно понимать абсолютно все, чтобы двигаться дальше. Мы исследуем неизвестные воды при помощи тех инструментов, которые имеются в нашем распоряжении, не теряя времени и сил на создание нового арсенала.

Прецедент, положивший начало этой традиции, был создан Галилеем. Как я уже говорил в первой главе, Галилей сосредоточил внимание на простейших, наиболее общих аспектах движения, пренебрегая частностями, и это преобразило всю научную картину мира. Галилея не интересовало, почему вещи движутся, вместо этого он поставил на первое место вопрос как они движутся.

Мы создаем совершенно новую науку о предмете чрезвычайно старом. В природе нет ничего древнее движения, и о нем философы написали томов немало и немалых. Однако я излагаю многие присущие ему и достойные изучения свойства, которые до сих пор не были замечены либо не были доказаны¹.

Как только Галилей показал, что состояние покоя есть лишь особый случай состояния движения с постоянной скоростью, аристотелевская философия, придававшая состоянию покоя особый статус, затрещала по швам. В действительности утверждение Галилея предполагает нечто большее, оно предполагает, что законы физики выглядят с точки зрения движущегося с постоянной скоростью наблюдателя точно так же, как и с точки зрения покоящегося. Если некоторый объект находится в состоянии равномерного прямолинейного

¹ «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению синьора Галилео Галилея Линчео, философа и первого математика светлейшего великого герцога тосканского с приложением о центрах тяжести различных тел». *Галилео Галилей. Избранные труды.* — М.: Наука, 1964.

движения относительно одного наблюдателя, то он также будет находиться в состоянии равномерного прямолинейного движения и относительно другого. Аналогично объект, который ускоряется или замедляется по отношению к одному наблюдателю, будет делать то же самое и по отношению к другому. Эта эквивалентность двух точек зрения получила название *принцип относительности Галилея*, который предвосхитил Эйнштейна почти на три столетия.

Нам очень повезло, что принцип относительности Галилея оказался справедлив, потому что, когда мы измеряем скорости и перемещения окружающих нас объектов относительно неподвижной и стабильной *terra firma*¹, Земля в то же самое время летит по орбите вокруг Солнца, Солнце обращается вокруг центра Галактики, Галактика движется относительно местной группы галактик и так далее. Так что мы в действительности не стоим на месте, а летим с достаточно большой скоростью относительно далеких галактик. Если бы нам пришлось принимать во внимание все эти движения, чтобы описать полет мяча относительно Земли, то ни Галилей, ни Ньютон никогда не смогли бы вывести свои законы. Законы классической физики работают только потому, что равномерное (в масштабах человеческой жизни) движение нашей Галактики относительно ее соседей не изменяет поведение предметов на Земле. Открытие же этих законов, в свою очередь, позволило астрономам впоследствии обнаружить движение нашей Галактики относительно других объектов во Вселенной.

Я вернусь к теме относительности позже. Сейчас же я хочу рассказать, как Галилей развил свой первый успех в исследовании равномерного движения. Поскольку большинство

¹ Terra firma — лат. «земная твердь». — *Примеч. пер.*

движений, которые мы наблюдаем в природе, не являются равномерными, Галилей считал необходимым исследовать и их. И снова мы встречаемся с уже сформулированной ранее максимой, требующей задаваться вопросом не «почему?», а «как?».

Мне думается, что сейчас неподходящее время для занятий вопросом о причинах ускорения в естественном движении, по поводу которого различными философами было высказано столько различных мнений; одни приписывали его приближению к центру, другие — постепенному частичному уменьшению сопротивляющейся среды, третьи — некоторому воздействию окружающей среды, которая смыкается позади падающего тела и оказывает на него давление, как бы постоянно его подталкивая; все эти предположения и еще многие другие следовало бы рассмотреть, что, однако, принесло бы мало пользы. Сейчас для нашего Автора будет достаточно, если мы рассмотрим, как он исследует и излагает свойства ускоренного движения (какова бы ни была причина ускорения), приняв, что моменты скорости, начиная с перехода к движению от состояния покоя, идут, возрастая в том же простейшем отношении, как и время, то есть что в равные промежутки времени происходят и равные приращения скорости¹.

Галилей рассматривает наиболее простой вид неравномерного движения, а именно такой, при котором скорость тела изменяется с течением времени равномерно. Насколько правомерна такая идеализация? Галилей гениально показал, что подобное упрощение фактически описывает движение всех падающих тел, если пренебречь сопротивлением воздуха. Это исследование открыло путь к ньютоновскому закону всемирного тяготения. Без знания о том, что в основе падения тел лежит равноускоренное движение, прийти к соотношению

¹ «Беседы и математические доказательства ...» (см. ссылку на с. 90).

между силой, массой и ускорением было бы весьма затруднительно. В действительности, чтобы прийти к этому выводу, Галилею пришлось преодолеть два препятствия, не имеющих непосредственного отношения к обсуждаемой теме, но его аргументы были настолько простыми и убедительными, что я не могу устоять перед соблазном привести их.

Аристотель утверждал, что падающие тела мгновенно приобретают свою скорость, стоит их только отпустить. Этот вывод был основан на непосредственном наблюдении, не подкрепленном никакими измерениями. Галилей был первым, кто убедительно показал, что это не так, причем в своем доказательстве он использовал до смешного простой пример. Доказательство Галилея основывалось на *мысленном эксперименте*. Но сейчас я предлагаю вместо мысленного эксперимента провести реальный. Возьмите банную тапочку и уроните ее в воду с высоты 20 сантиметров. Затем повторите эксперимент, уронив тапочку с высоты 10 сантиметров. Если предположить, что громкость, с которой тапочка делает «плюх», зависит от ее скорости, вы легко убедитесь, что скорость тапочки увеличивается в процессе падения.

Следующим шагом Галилея стала демонстрация того факта, что все предметы, независимо от их массы, должны падать с одним и тем же ускорением, если пренебречь сопротивлением воздуха. Большинство людей считают, что Галилей продемонстрировал это своим знаменитым экспериментом с бросанием пушечного ядра и мушкетной пули с Пизанской башни. В действительности это легенда. Галилей никогда ничего не бросал с Пизанской башни, а вместо этого предложил, на этот раз уже действительно *мысленный* эксперимент, который обнажил парадокс, возникающий при предположении, что тело, имеющее вдвое большую массу, должно падать вдвое быстрее. Представьте себе, что вы

бросаете с башни два пушечных ядра одинаковой массы. Они должны падать с одним и тем же ускорением и достичь земли одновременно, даже если скорость их падения зависит от массы. Теперь представьте себе, что, пока они падают, некто очень проворный высовывается в окно и склеивает эти ядра друг с другом. Теперь мы имеем одно тело, масса которого в два раза больше массы каждого из ядер. Здравый смысл говорит нам, что это новое тело ни с того ни с сего не станет падать со вдвое большим ускорением, чем падали ядра по отдельности, до того, как некто мазнул их клеем. Таким образом, мы неизбежно приходим к выводу, что ускорение падающих тел не должно зависеть от их массы.

После этого Галилей перешел от мысленных экспериментов к реальным и занялся непосредственным измерением ускорения падающих тел, чтобы убедиться в том, что оно постоянно. Напомню, что это означает, что скорость изменяется с течением времени равномерно. Опять-таки я обращаю внимание на то, что при создании того фундамента, на котором впоследствии была создана теория тяготения, Галилей предпринял попытку описать, как падают тела, но не *почему*. Это похоже на пример Фейнмана с шахматами: сначала мы внимательно изучаем конфигурации шахматной доски, затем тщательно описываем движение фигур. Снова и снова, начиная с Галилея, мы проходим путь от описания «игрового поля», на котором разворачиваются физические явления, к попытке понять правила, по которым эти явления «играют». В окончательной версии построенной таким способом картины уже игровое поле определяет правила, и позднее я покажу, что именно таким путем развивается современная физика... но я отвлекся.

Галилей не остановился на достигнутом. Он занялся описанием более сложного типа движения и получил его путем

«копирования» уже достигнутого результата. До этого момента мы рассматривали движение только в одном измерении — либо падение вниз, либо движение в горизонтальной плоскости. Но брошенный мяч совершает одновременно оба эти типа движения. Если не учитывать сопротивление воздуха, то траектория мяча будет представлять собой дугообразную математическую кривую, называемую параболой. Галилей доказал это, используя уже полученные ранее результаты. Он предположил, что двухмерное движение может быть представлено как совокупность двух независимых движений, а именно движения с постоянным ускорением в вертикальном направлении и движения с постоянной скоростью в горизонтальном. Сложите вместе эти два движения, и вы получите параболу.

Несмотря на кажущуюся простоту вышеприведенного объяснения, независимость горизонтального и вертикального движения часто становится причиной ошибок даже среди физиков. Рассмотрим, к примеру, двух спортсменов: прыгуна в длину и баскетболиста. Прыгун в длину разбегаются и, достигая максимальной скорости, отталкивается от земли вверх, пролетая по воздуху больше восьми метров. Баскетболист, наоборот, не имея никакой горизонтальной скорости, прыгает вверх, находясь под баскетбольной корзиной. На вопрос, кто из них дольше находится в воздухе, часто отвечают, что прыгун в длину, потому что он пролетает большее расстояние.

На самом деле, если оба спортсмена достигают в своем прыжке одинаковой высоты, то они проводят в воздухе одинаковое время, потому что горизонтальное движение прыгуна в длину происходит независимо от его вертикального движения. Аналогично в демонстрационном школьном опыте, когда один шарик выстреливается горизонтально, в то

время как второй одновременно с выстрелом начинает свободно падать, оба шарика достигают поверхности стола одновременно, несмотря на то что выпущенный горизонтально шарик пролетает гораздо большее расстояние, чем падающий отвесно.

Метод Галилея, показавшего, что два измерения могут быть представлены как две копии одного, точно так же, как и два соответствующих этим измерениям движения, был впоследствии взят на вооружение физиками. Тем же методом, то есть копированием имеющихся решений, большинство задач современной физики могут быть сведены к уже ранее решенным задачам, потому что задачи, которые имеют точное аналитическое решение, можно сосчитать по пальцам двух рук (ну, может быть, понадобятся еще несколько пальцев ног). В частности, если мы перейдем от двух пространственных измерений к трем, обнаружится, что для большинства трехмерных задач невозможно получить точное решение, даже задействовав всю вычислительную мощь всех существующих в мире суперкомпьютеров. Те же трехмерные задачи, которые мы можем решить, либо являются частными случаями более общей трехмерной задачи, когда мы искусственно ограничиваем возможный диапазон начальных и граничных условий, либо могут быть представлены в виде независимой комбинации нескольких более простых двухмерных или одномерных задач.

Примеры подобного подхода можно найти везде. Я уже рассказывал о построении Стандартной солнечной модели, в которой внутренняя структура Солнца представляется центрально-симметричной, то есть считается, что все параметры — плотность, давление, температура, химический состав — зависят только от одной величины: расстояния от центра Солнца. Это позволяет упростить трехмерную модель

внутреннего строения Солнца до одномерной и записать все уравнения как функции одной-единственной переменной — расстояния r .

Еще один пример упрощения трехмерной задачи, в котором мы, в отличие от солнечной модели, не пренебрегаем двумя измерениями, а разбиваем задачу на одномерную и двухмерную, можно найти у себя дома на кухонном столе в виде кристалла поваренной соли. Законы квантовой механики, описывающие поведение атомов и субатомных частиц, позволяют объяснить законы образования химических соединений. Простейшим из всех атомов является атом водорода. Он состоит из одного протона, вокруг которого обращается один электрон. Решение уравнения, описывающего взаимодействие электрона и протона, однако, не столь просто.

Электрон в атоме водорода может находиться в нескольких состояниях, различающихся полной энергией. Каждое из основных энергетических состояний, или, как чаще говорят, каждый из *энергетических уровней*, в свою очередь, состоит из *подуровней*, различающихся формой электронной «орбиты». На простейшем уровне все химические взаимодействия, в том числе и те, которые отвечают за биохимические процессы, могут быть описаны набором правил, заключающихся в подсчете количества доступных электрону состояний. Элементы, у которых все доступные свободные состояния, кроме одного, заняты электронами, очень активно соединяются с элементами, у которых все доступные свободные состояния, кроме одного, свободны. Например, поваренная соль образуется, когда атом натрия, имеющий один электрон на верхнем уровне, соединяется с атомом хлора, у которого на верхнем уровне имеется одно не занятое электронами состояние. Атом натрия отдает «лишний» электрон атому хлора, у которого как раз «недостает» одного электрона.

Единственная причина, по которой мы оказываемся в состоянии вычислить все энергетические уровни и подуровни даже такого простого атома, как атом водорода, состоит в том, что сложная трехмерная задача описания движения электрона может быть разделена на две более простые задачи, каждая из которых может быть решена независимо от другой, — на одномерную задачу движения электрона вдоль радиуса и на двухмерную задачу движения электрона по поверхности сферы заданного радиуса.

Вот более современный и более экзотический пример упрощения подобного рода. Стивен Хокинг приобрел мировую известность, когда в 1974 году показал, что черные дыры на самом деле не черные — они должны излучать, причем температура излучения черной дыры определяется ее массой. Причина, по которой открытие Хокинга стало для всех сюрпризом, состоит в том, что свое название черная дыра получила отнюдь не из поэтических соображений: сила тяжести на поверхности черной дыры столь велика, что ничто не может ее покинуть, даже свет. Так как же тогда она может что-то излучать? Хокинг показал, что в условиях сильного гравитационного поля законы квантовой механики делают классический вывод о невозможности покинуть черную дыру не вполне точным. Подобное уклонение от классических «запрещающих» теорем — достаточно частое явление в квантовой механике.

Например, в нашей классической реальности человек, живущий в долине между двумя горными хребтами, может попасть в любую из соседних долин, только предварительно взобравшись на один из горных хребтов. Однако в квантовой механике частица, находящаяся в аналогичном положении, способна преодолеть потенциальный барьер, не обладая необходимой для этого энергией. Подобный эффект носит

название *туннельного*. Стандартным примером такого поведения является радиоактивный распад. На частицы, находящиеся в атомном ядре — протоны и нейтроны, — действуют две силы: ядерное притяжение и электрическое отталкивание (между протонами). На малых расстояниях ядерное притяжение гораздо сильнее, чем электрическое отталкивание, что и делает ядра устойчивыми. Но если один из протонов в силу квантовой неопределенности окажется достаточно далеко от ядра, электрическая сила превысит ядерную, и протон улетит прочь, хотя его энергии недостаточно, чтобы преодолеть ядерное притяжение. Вот еще один пример: если я брошу мяч в окно, то либо его энергии окажется достаточно, чтобы разбить стекло и вылететь наружу, либо стекло окажется прочнее, и мяч отскочит от него. Но когда размеры мяча становятся сравнимыми с размерами элементарных частиц, его поведение радикальным образом меняется. В частности, обычно фотоны отражаются от зеркала, но если толщина зеркального покрытия сравнима с длиной волны фотона, то некоторые фотоны начинают туннелировать и проходить сквозь зеркало. Я подробно опишу правила, управляющие таким поведением частиц, позже, а сейчас просто поверьте мне на слово.

Так вот, Хокинг показал, что такие же явления могут происходить вблизи горизонта черной дыры. Частицы способны туннелировать сквозь гравитационный барьер и покидать черную дыру. Ему впервые удалось соединить законы квантовой механики с уравнениями общей теории относительности, чтобы предсказать новое явление. И опять-таки это оказалось возможным благодаря тому, что Хокинг разделил сложную трехмерную задачу на две более простые: одномерную и двумерную: он независимо рассмотрел движение частицы вдоль радиуса и вдоль поверхности горизонта черной дыры. Если бы подобное упрощение оказалось невоз-

возможным, черные дыры еще долгое время оставались бы для нас темными сферическими лошадками в вакууме.

Как ни интересны все эти технические приемы, они образуют только верхушку айсберга. Реальная причина, по которой мы постоянно повторяем уже сделанное ранее, открывая новые законы, состоит не столько в нашем характере, сколько в характере самой природы. Природа постоянно повторяет себя в различных явлениях. Именно по этой причине мы почти всегда обнаруживаем в новых теориях переосмысление уже открытых физических законов. Ньютон при формулировке закона всемирного тяготения переосмыслил результаты Галилея. Он также использовал в своей работе огромный набор данных, полученный современниками Галилея — датским астрономом Тихо Браге и его учеником Иоганном Кеплером.

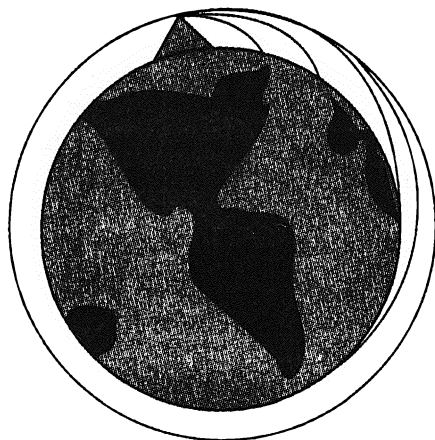
Тихо Браге и Иоганн Кеплер были незаурядными людьми. Браге происходил из древнего датского рода и приобрел известность благодаря своим наблюдениям вспышки сверхновой 1572 года. Датский король Фредерик II подарил ему остров, на котором Тихо Браге построил самую совершенную для своего времени обсерваторию Ураниборг. За последующие десять лет ему удалось повысить точность астрономических измерений в десять раз, и это еще до изобретения телескопа! К сожалению, преемник Фредерика II новый король Кристиан IV был равнодушен к наукам, он лишил Тихо Браге финансовой поддержки и запретил ему заниматься астрономией и алхимией. Браге вынужден был переехать в Прагу, где получил должность придворного математика и астролога императора Священной Римской империи Рудольфа II. За год до смерти Тихо Браге нанял молодого немецкого ученого Иоганна Кеплера, поручив ему произвести необходимые расчеты, чтобы согласовать

результаты наблюдений с существующей космологической моделью.

В отличие от Браге, Кеплер происходил из малообеспеченной семьи и вынужден был зарабатывать на жизнь деятельностью весьма далекой от чистой науки. Помимо научных изысканий, Кеплер нашел время и для судебной защиты своей матери от обвинений в ведьмовстве, и для написания научно-фантастического рассказа о путешествии на Луну. Тем не менее Кеплер подошел к задаче обработки наблюдательных данных Тихо Браге с необычайным рвением. Не имея не только компьютера, но даже простого механического арифмометра, он выполнил огромный объем вычислений и сумел сформулировать три простых закона движения планет, которые впоследствии использовал Ньютон при создании своей теории всемирного тяготения.

Я уже упоминал второй закон Кеплера, гласящий, что отрезок прямой, соединяющий планету с Солнцем, при движении планеты по орбите заметает за равные промежутки времени равные площади. Именно этот закон использовал Ньютон для доказательства существования силы притяжения между Солнцем и планетой. Мы настолько привыкли к идее, что движение планет полностью определяется силой, направленной в сторону Солнца, что не осознаем, насколько она на самом деле парадоксальна. На протяжении столетий до Ньютона предполагалось, что для поддержания движения планет вокруг Солнца должна существовать сила, которая толкает их в направлении движения. Ньютон же, полагаясь на закон равномерного движения, открытый Галилеем, понял, что такая сила не нужна. В самом деле, если из принципа относительности Галилея следует, что при движении брошенного тела его горизонтальная скорость будет оставаться постоянной, то это будет означать, что, придав телу

достаточно большую скорость, мы сможем вывести его на орбиту вокруг Земли. Из-за кривизны поверхности Земли, несмотря на то что тело будет продолжать падать, Земля будет, в свою очередь, «убегать» из-под него. При достаточно большой начальной скорости тела скорость падения тела сравняется со скоростью «убегания» поверхности Земли. Эта ситуация проиллюстрирована на следующем рисунке, скопированном из «Начал» Ньютона:



После того как Ньютон понял, каким образом сила, тянущая тело вниз, к центру Земли, обеспечивает его вечное движение по орбите, для него уже не составляло труда экстраполировать этот вывод и на движение планет и комет вокруг Солнца. Кстати, тот факт, что находящиеся на орбите тела постоянно «падают», отвечает за состояние невесомости, с которым сталкиваются космонавты. Невесомость на орбите не имеет ничего общего с отсутствием гравитационного притяжения Земли, которое на высоте орбиты космической станции столь же сильно, как и на поверхности.

Вышесказанное находится в прямом и неустранимом противоречии со словами самого Ньютона, ибо он прямо указывает, что движущиеся спутники удерживаются от падения ЦЕНТРОБЕЖНОЙ силой, а, следовательно, не падают, как пишет автор этой книги. Вы сами можете убедиться в этом, прочитав "Поучение" Ньютона, взятое из третьего издания "Начал" в переводе академика А.Н. Крылова, напечатанного в 1989 году:

(прим. копировщика)

— 513 —

ПОУЧЕНИЕ

Доказательство этого предложения может быть объяснено подробнее следующим образом. Если бы около Земли обращалось несколько лун, подобно тому как около Юпитера и Сатурна, то времена их обращений (на основании наведения) следовали бы планетным законам, открытым *Кеплером*, и поэтому их центростремительные силы были бы по предложению I обратно пропорциональны квадратам расстояний. Если бы наименьшая из этих лун была малой и почти что касалась бы вершин высочайших гор, то центростремительная сила, которою она удерживалась бы на своей орбите (согласно предыдущему расчету), равнялась бы приблизительно силе тяжести на вершине этих гор; если бы этот спутничек лишиться его поступательного движения по орбите, то вследствие отсутствия центробежной силы, от которой он продолжает оставаться на своей орбите, он под действием предыдущей стал бы падать на Землю и притом с такою же скоростью, с какою на вершинах этих гор падают тяжелые тела, ибо в обоих случаях действующие силы равны. Если бы та сила, под действием которой падал бы этот маленький низший спутничек, была отличною от силы тяжести, спутничек же этот, подобно всем телам, тяготел бы к Земле одинаково с телами, находящимися на вершинах гор, то под совокупным действием обеих сил он падал бы вдвое быстрее. Поэтому, так как обе силы, т. е. действующая на тяжелые тела и действующая на спутничек, направлены к центру Земли и между собою подобны и равны, они те же самые и имеют ту же самую причину (по правилам I и II). Следовательно, та сила, которою Луна удерживается на своей орбите, есть та же самая, которую мы называем силою тяжести, ибо в противном случае или сказанный спутничек на вершинах гор не имел бы тяжести, или же падал бы вдвое скорее, нежели падают тяжелые тела.

Остальные законы Кеплера были для Ньютона уже, фигурально выражаясь, розочками на торте — они завершали создаваемую им картину мира. Количественный ключ к природе гравитационного притяжения Ньютону дал третий закон, устанавливающий математическую связь между периодом обращения планеты вокруг Солнца и расстоянием, на котором обращается планета. Из третьего закона Кеплера Ньютон получил, что скорость движения планеты падает обратно пропорционально квадратному корню из ее расстояния от Солнца.

Вооруженный этим знанием и законом, выведенным на основе результатов Галилея, гласящим, что ускорение тела пропорционально действующей на него силе, Ньютон смог показать, что если планета притягивается Солнцем с силой, пропорциональной произведению массы планеты на массу Солнца и обратно пропорциональной расстоянию между ними, то это естественным образом приводит к третьему закону Кеплера. Коэффициент пропорциональности в записи закона всемирного тяготения называется *ньютоновской гравитационной постоянной* и обычно обозначается буквой G .

Возможности техники XVII века не позволяли Ньютону непосредственно измерить значение гравитационной постоянной, поэтому он предпринял ряд косвенных проверок своего закона. Предположив, что открытый им закон универсален, Ньютон рассчитал период обращения Луны вокруг Земли. Для этого ему нужно было знать ускорение свободного падения на поверхности Земли, радиус Земли и расстояние от Земли до Луны. Все эти величины были в его время уже достаточно точно измерены. По расчетам Ньютона получалось, что период обращения Луны вокруг Земли должен составлять около 28 дней, что прекрасно

согласуется с наблюдениями. Наконец, тот факт, что открытые Галилеем спутники Юпитера также подчинялись законам Кеплера, обращаясь вокруг Юпитера, служил сильным подтверждением универсальности закона тяготения Ньютона.

Я рассказываю эту историю не для того, чтобы еще раз показать, как наблюдение того, *как* движутся тела — в данном случае планеты, — приводит к пониманию того, *почему* они движутся, а скорее, чтобы продемонстрировать, как ученым удалось использовать эти результаты в современных исследованиях. Начну с замечательного прецедента, созданного британским ученым Генри Кавендишем примерно через 120 лет после открытия Ньютоном закона всемирного тяготения.

Став после защиты постдоком в Гарвардском университете, я быстро усвоил там ценный опыт: прежде чем начинать писать научную статью, следует придумать для нее вызывающее название. Я тогда посчитал, что это новая мода в науке, но оказалось, что подобная традиция восходит еще к Кавендишу, который впервые применил этот прием в 1798 году.

Кавендиш знаменит тем, что ему первому удалось в лабораторных условиях измерить силу притяжения между двумя телами известной массы и в результате вычислить значение гравитационной постоянной G . Сообщая об этом в Королевском Обществе, он не назвал свою статью «Об измерении величины гравитационной постоянной» или «Определение ньютоновской константы G ». Нет, он назвал ее «Взвешивание Земли».

У Кавендиша была веская причина для подобного вызывающего заголовка. К тому времени закон всемирного тяготения

Ньютона был уже общепризнанным, так же как и уверенность в том, что сила, ответственная за движение планет вокруг Солнца, имеет ту же природу, что и сила, ответственная за движение Луны вокруг Земли. Измерив расстояние до Луны, что было нетрудно сделать даже в семнадцатом веке, определив положение Луны относительно далеких звезд из двух разных мест на земной поверхности и зная период ее обращения — около 28 дней, — можно легко вычислить скорость, с которой движется Луна по своей орбите.

Повторюсь, что главная заслуга Ньютона заключается не столько в объяснении закона Кеплера, утверждающего, что скорость планеты, вращающейся вокруг Солнца, обратно пропорциональна квадратному корню из расстояния до Солнца, сколько в том, что он показал, что этот же закон может применяться и к движению Луны, и к падению предметов на поверхности Земли. Закон всемирного тяготения предполагает, что коэффициент пропорциональности G один и тот же и для силы, действующей между Солнцем и планетой, и для силы, действующей между Землей и яблоком. Но Ньютон не привел доказательств, что значение G в обоих случаях обязано быть одинаковым. Это была лишь гипотеза, основанная на предположении, что закон должен быть простым, а значит, значение G должно быть одинаковым для всех тел, независимо от их природы.

Но, зная расстояние, на котором обращается Луна вокруг Земли, и скорость, с которой Луна движется по орбите, мы тем не менее не можем определить значение самой константы G , потому что для этого нам необходимо знать массу Земли. С другой стороны, имея независимо измеренное значение G , мы могли бы вычислить массу Земли на основании имеющихся астрономических данных. Таким образом, Кавендиш оказался первым человеком, которому удалось

независимо измерить величину G , а следовательно, вычислить массу Земли.

Заслуга Кавендиша состоит не только в блестящей рекламе, которую он сделал своему открытию, но и в технике, которую он использовал для взвешивания Земли. Разработанные им экспериментальные методы используются и сегодня. Наши лучшие оценки массы Солнца основываются на измерении гелиоцентрических расстояний и скоростей планет Солнечной системы. Сегодня мы способны выполнить подобные измерения с точностью лучшей, чем одна миллионная, но, к сожалению, ньютоновская гравитационная постоянная является одной из наименее точно измеренных мировых констант. Она известна нам с точностью не более одной стотысячной. В результате и наши знания о массе Солнца ограничиваются этой точностью.

Кстати, неопределенность в значении гравитационной постоянной ограничивает не только возможность измерения массы Солнца, она точно так же ограничивает нашу возможность определения массы любого другого небесного тела, равно как и массы всей Вселенной. Как мы увидим далее, из-за того, что у нас нет возможности прямого измерения значения гравитационной постоянной на расстояниях, меньших одной миллионной сантиметра, мы не в состоянии узнать, выполняется ли на подобных расстояниях закон всемирного тяготения. Подобные исследования могли бы пролить свет на существование дополнительных пространственных измерений, помимо трех привычных.

Тем не менее, когда вы имеете хорошо работающий закон, не следует останавливаться. Наше Солнце и вместе с ним вся Солнечная система обращаются вокруг центра Галактики, благодаря чему мы, используя известное расстояние от Солнца до центра Галактики (около 25 000 световых лет) и ско-

рость орбитального движения Солнечной системы (около 200 км/с), можем «взвесить» Галактику. Получается, что масса вещества, заключенного внутри галактической орбиты Солнечной системы, составляет примерно сто миллиардов масс Солнца. Это радует, потому что общее количество света, излучаемого нашей Галактикой, примерно равно количеству света, которое испускали бы сто миллиардов звезд, похожих на Солнце. Оба этих факта дают основание предположить, что общее количество звезд в нашей Галактике также составляет порядка ста миллиардов.

Однако самое интересное начинается, когда мы измеряем скорости движения небесных тел, расположенных дальше от центра Галактики, чем Солнце. Вместо того чтобы падать с ростом расстояния, их скорость остается постоянной. Это свидетельствует о том, что основная масса Галактики не сосредоточена в ее внутренней области, более того, она не сосредоточена в звездах. По последним оценкам, масса Галактики по крайней мере в десять раз превышает массу наблюдаемого нами светящегося вещества! Более того, аналогичные наблюдения движений звезд в других галактиках дают такие же результаты. Применяя закон всемирного тяготения к движению скоплений галактик, мы снова получаем вычисленную массу в десять раз больше наблюдаемой. Используя закон всемирного тяготения для «взвешивания» Вселенной, мы опять обнаруживаем, что по меньшей мере 90 % ее вещества представляет собой так называемую *темную материю*.

Открытие того, что основная часть массы Вселенной, по видимому, представляет собой таинственную ненаблюдаемую темную материю, является одной из самых интригующих и активно обсуждаемых загадок современной физики. Для того чтобы рассказать обо всех работах, которые ведутся

в этой области, понадобилась бы целая книга (кстати, я одну такую уже написал). Сейчас же я хочу просто сообщить вам об этом замечательном факте и показать, что эта актуальная тема современных исследований базируется на точно таком же анализе, которым пользовался Кавендиш, когда более двух веков тому назад задумал взвесить Землю.

После всего прочитанного у вас, возможно, возникнет искушение спросить: «А на каком основании мы экстраполируем закон всемирного тяготения на всю Вселенную? Вместо того чтобы предполагать существование таинственной ненаблюдаемой темной материи, не проще ли предположить, что закон всемирного тяготения попросту не работает на галактических расстояниях?» Некоторые физики действительно рассматривают возможность модификации ньютоновского закона, но я постараюсь объяснить, почему введение таинственной темной материи предпочтительнее, чем изменение закона гравитации. Ньютоновский закон тяготения до настоящего времени прекрасно описывал движение буквально всего под Солнцем, и у нас не было никаких причин сомневаться в корректности его экстраполяции на большие расстояния. Кроме того, в истории имеется ряд фактов блестящего подтверждения правильности такого подхода. Например, через некоторое время после открытия планеты Уран обнаружилось, что в его движении имеются возмущения, которые не могли быть объяснены притяжением Солнца и других известных на тот момент планет. Могло ли это послужить основанием для пересмотра закона всемирного тяготения? Да, но проще было предположить существование неизвестного ранее небесного тела, которое своим притяжением возмущает движение Урана. Точные вычисления, произведенные Адамсом и Лаверье, дали астрономам координаты этого небесного тела, и когда они навели в указанную

точку телескоп, то действительно обнаружили новую планету, получившую имя Нептун. Позже наблюдения за движением Нептуна привели к случайному открытию в 1930 году планеты Плутон.

А вот еще более ранний случай, когда уверенность в точности закона тяготения привела к новому открытию, причем это открытие не имело непосредственного отношения к самому закону. В конце XVII века датский астроном Оле Рёмер, наблюдая движение спутников Юпитера, обнаружил интересный факт: моменты затмений спутников Юпитером отличались от предсказанных. Например, если в какой-то день затмение происходило на 8 минут раньше предсказанного времени, то спустя шесть месяцев оно происходило на 8 минут позже вычисленного момента. Рёмер догадался, что это вызвано не несовершенством ньютоновского закона, а конечностью скорости света. Возможно, вы помните, что свету требуется 8 минут, чтобы добраться от Солнца до Земли. Значит, в эпоху противостояния Земля находится к Юпитеру на 8 световых минут ближе, чем Солнце, а в эпоху соединения — на 8 световых минут дальше, что и приводит к наблюдаемой вариации моментов затмений спутников Юпитера. Таким образом, Рёмеру удалось вычислить скорость света за 200 лет до того, как ее измерили непосредственно в лабораторных условиях.

Хотя мы и не уверены наверняка в своем вправе «взвешивать» все бóльшие и бóльшие области Вселенной, так же как мы взвешивали Землю и Солнце, у нас нет другого способа это делать. А до тех пор экстраполяция ньютоновского закона остается лучшим выбором, который к тому же дает нам надежду на дальнейший научный прогресс. Не спорю, в физике зачастую один-единственный экспериментальный факт способен убить прекрасную теорию, однако наблюдаемые

движения космических объектов в нашей и в других галактиках не являются таким убийственным фактом. Эти движения можно объяснить существованием темной материи, в пользу которой в настоящее время имеется множество других независимых аргументов, в частности, она требуется для модели формирования крупномасштабной структуры Вселенной. Будущие наблюдения покажут, была ли обоснована наша упрямая настойчивость, и, возможно, прольют свет на вопрос, из чего на самом деле сделана Вселенная.

После выхода книги о темной материи я получил множество писем от читателей, в которых они выдвигали собственные оригинальные и смелые теории и критиковали профессиональных ученых за «узость мышления и зашоренность сознания». Я сейчас пытаюсь убедить вас в том, что открытость мышления в физике означает, прежде всего, упрямую приверженность хорошо проверенным работающим теориям до тех пор, пока экспериментальные факты не сделают дальнейшее применение этих теорий невозможным. Большинство научных революций XX века были основаны не на отрицании старых теорий, а на попытках их модификации с целью приспособления к объяснению новых экспериментальных результатов. Как говорил один из самых оригинальных и ярких физиков нашего времени Ричард Фейнман, «что нам действительно нужно, так это воображение, но воображение в надежной смиренной рубашке»¹.

Для примера рассмотрим, наверное, самую известную революцию в физике XX века — создание Эйнштейном теории относительности. Хотя теория относительности и вынудила нас радикально пересмотреть наши понятия о пространстве и времени, толчком для ее создания была куда менее амби-

¹ Фейнман Р. Характер физических законов. — М.: Наука, 1987.

циозная попытка согласовать два давно устоявшихся физических закона. Вся суть анализа Эйнштейна заключалась в переформулировке современной физики в такой форме, в которой она вмещала бы принцип относительности Галилея, открытый за триста лет до этого. С этой точки зрения логика, лежащая в основе эйнштейновской теории, весьма проста. Галилей утверждал, что само существование равномерного движения требует, чтобы законы физики, действующие в движущейся и в неподвижной лаборатории, были идентичными. Из этого требования вытекает неожиданный результат: невозможно поставить такой эксперимент, который дал бы ответ на вопрос, движетесь вы или находитесь в состоянии покоя. Любой наблюдатель, движущийся с постоянной скоростью по отношению к другому наблюдателю, может утверждать, что он находится в состоянии покоя, а движется другой. Каждый, кто путешествовал в современных поездах дальнего следования, вероятно, обращал внимание на то, что, когда поезд очень плавно трогается, часто создается иллюзия, что двинулся другой поезд, который стоит у соседней платформы (к пригородным электричкам это не относится).

Не побоюсь утверждать, что наибольший вклад в физику XIX века внес выдающийся физик своего времени Джеймс Клерк Максвелл, который создал полную теорию электромагнетизма, теорию, описывающую большинство физических явлений, лежащих в основе нашей сегодняшней техники — от источников света и электродвигателей до компьютеров. Венцом этой теории было предсказание особого поведения света.

Еще в начале XIX века физики, самым известным из которых был британский ученый Майкл Фарадей — ученик переплетчика, ставший директором «сердца британской науки»,

Королевского института, — обнаружили связь между электричеством и магнетизмом — двумя силами, которые первые натурфилософы считали различными. Действительно, у магнитов всегда есть два полюса: северный и южный. Северный полюс притягивается к южному, и наоборот. Если разрезать магнит посередине, то вы не получите два разных полюса, части магнита по-прежнему будут иметь северный и южный полюсы. Электрические заряды, напротив, как правило, существуют по отдельности и, как показал Бенджамин Франклин, предложивший называть разноименные заряды положительными и отрицательными, их легко изолировать друг от друга.

В течение первой половины XIX века ученые находили все новые свидетельства связи между электричеством и магнетизмом. Сначала было установлено, что магнитные поля, то есть магниты, могут быть созданы движущимися электрическими зарядами, то есть токами. Далее было обнаружено, что магнит способен отклонять движущийся электрический заряд. Но самый главный сюрприз преподнес Майкл Фарадей (и независимо от него американский физик Джозеф Генри), показавший, что движущийся магнит способен создавать электрическое поле и возбуждать в проводнике электрический ток.

С последним открытием связана интересная история, которую я не могу не рассказать (особенно сегодня, в разгар дебатов о финансировании таких проектов, как сверхпроводящий суперколлайдер, о котором я расскажу позже). Будучи директором Королевского института, Фарадей занимался «чистой наукой», как принято говорить сейчас — фундаментальными исследованиями природы электричества и магнетизма, не уделяя большого внимания практическому применению полученных результатов. Тем не менее все современные технологии

базируются именно на открытиях Фарадея. И вот однажды в лабораторию к Фарадею пришел тогдашний английский премьер-министр и, посмотрев на вертящиеся магниты и прыгающие стрелки измерительных приборов, недоуменно спросил, какая же практическая польза от всех этих фокусов. Фарадей ответил, что пока он не может определенно сказать, как использовать на практике его открытия, но уверен, что они очень важны. Настолько важны, что не пройдет и нескольких десятилетий, и Ее Величество обложит их налогами. И он оказался прав.

В середине XIX века стало ясно, что фундаментальная связь между электричеством и магнетизмом определенно существует, но суть этой связи была не ясна. Заслуга Максвелла состоит в создании единой теории электричества и магнетизма, которая показала, что электрическая и магнитная силы на самом деле представляют собой просто две стороны одной медали. В частности, Максвелл, обобщив имеющиеся экспериментальные данные, получил, что любое изменение электрического поля создает магнитное поле, а любое изменение магнитного поля, в свою очередь, создает электрическое поле. Если вы покоитесь относительно электрического заряда, вы наблюдаете только электрическое поле, но, начав двигаться относительно него, вы обнаружите появление магнитного поля. Другими словами, результат, который вы получаете в результате измерения, зависит от состояния вашего движения. То, что один наблюдатель фиксирует как электрическое поле, другой фиксирует как магнитное. Эти два поля — просто разные проявления одной сущности!

Этот результат имел одно очень важное следствие. Если я стану покачивать электрический заряд вверх-вниз, то вследствие движения заряда возникнет периодически изменяющееся магнитное поле. Это изменение магнитного поля,

в свою очередь, вызовет изменяющееся электрическое поле, которое, в свою очередь, снова породит изменяющееся магнитное поле, и так далее. Электромагнитные возмущения, или волны, будет распространяться от колеблющегося заряда во все стороны. Это замечательный результат. Еще более замечательной оказалась возможность вычислить скорость, с которой должно распространяться это возмущение, основываясь исключительно на результатах измерений сил, действующих между неподвижными зарядами и между магнитами. Полученная Максвеллом скорость распространения электромагнитной волны удивительным образом совпала с уже известной на тот момент скоростью света. Это позволило предположить, что свет является не чем иным, как электромагнитной волной, скорость которой определяется значением двух констант, одна из которых характеризует силу взаимодействия между электрическими зарядами, а вторая — силу взаимодействия между магнитами.

Переоценить роль этого открытия невозможно. Свет является главным действующим лицом во всех действиях физической драмы XX века, и сейчас я собираюсь рассказать об одном из этих действий. Эйнштейн был, разумеется, знаком с результатами Максвелла и понимал, что они приводят к парадоксу, который ставит под сомнение справедливость принципа относительности Галилея.

Галилей утверждал, что законы физики не должны зависеть от того, покоится или движется физическая лаборатория, в которой они изучаются. Например, два физика, один в лаборатории на борту корабля, плывущего с постоянной скоростью, а другой в университетской лаборатории на берегу, измеряя силу, действующую между двумя неподвижными относительно их лабораторий электрическими зарядами, расположенными в одном метре друг от друга, должны полу-

читать один и тот же результат. Аналогично, измеряя силу, действующую между двумя магнитами, помещенными в метре друг от друга, они тоже должны получить одинаковые результаты.

С другой стороны, Максвелл говорит нам, что, если мы станем покачивать заряд вверх-вниз, мы будем производить электромагнитные волны, которые будут удаляться от нас со скоростью, определяемой законами электромагнетизма. Таким образом, наблюдатель, трясуший заряды на корабле, увидит электромагнитные волны, удаляющиеся от него с этой скоростью. Аналогично наблюдатель, трясуший заряды на берегу, тоже увидит электромагнитные волны, удаляющиеся от него с такой же скоростью. Для того чтобы выполнялся принцип относительности Галилея, скорость электромагнитных волн, генерируемых наблюдателем на корабле, должна складываться со скоростью корабля. То есть скорости электромагнитных волн, генерируемых наблюдателем на корабле и наблюдателем на берегу, должны различаться.

Вот тут, как понял Эйнштейн, и возникает парадокс. Допустим, мы движемся рядом с электромагнитной волной почти с той же скоростью, что и сама волна, и проводим измерения электрического и магнитного поля этой волны. Мы обнаружим, что электрическое поле медленно меняется, но даже эти медленные изменения порождают изменяющееся магнитное поле, которое, в свою очередь, опять порождает электрическое... Максвелл утверждает, что эти возмущения полей должны двигаться со скоростью, определяемой константами электрического и магнитного взаимодействий, которые, в силу принципа относительности Галилея, должны быть относительно движущегося наблюдателя теми же самыми, что и для неподвижного, а значит, скорость электромагнитной волны относительно нас должна быть по-преж-

нему равна скорости света, что противоречит первоначальной послышке о том, что мы движемся почти с той же скоростью, что и сама волна.

Эйнштейн, таким образом, столкнулся со следующей очевидной проблемой. Либо надо отказаться от принципа относительности, утверждающего, что законы физики не зависят от того, изучаете вы их в состоянии покоя или в состоянии равномерного движения, либо отказаться от красивой теории Максвелла. В результате Эйнштейн совершил поистине революционный шаг, позволивший сохранить и принцип относительности, и теорию Максвелла. Справедливо считая, что и принцип относительности, и теория Максвелла слишком разумны, чтобы оказаться неверными, он принял смелое решение пересмотреть понятия пространства и времени.

Его решение оказалось на удивление простым. Единственным способом удовлетворить принципу Галилея и теории Максвелла было постулировать, что скорость электромагнитных волн всегда равна одной и той же величине, независимо от того, как движется наблюдатель, который эту скорость измеряет.

На первый взгляд это требование звучит не парадоксально, но задумайтесь на мгновение, что из него следует. Если я смотрю, как ребенок в проносящемся мимо меня поезде бросает погремушку в сидящую напротив него мать, то скорость погремушки, которую я измеряю, допустим, 10 км/ч, будет складываться со скоростью поезда, скажем 100 км/ч, и составит 110 км/ч. В то же время мать, сидящая напротив ребенка, увидит летящую в нее погремушку со скоростью 10 км/ч. Однако если вместо того, чтобы бросить погремушку, ребенок посветит в глаз матери лазерной указ-

кой, результат будет совсем иным. Специальная теория относительности требует, чтобы скорость светового луча, которую я измеряю, составляла в точности 299 792 458 м/с, и точно такую же скорость имел бы этот же световой луч с точки зрения матери ребенка.

Единственный способ добиться этого состоит в том, чтобы каким-то образом «настроить» наши измерения расстояния и времени, чтобы оба результата измерения давали одну и ту же скорость распространения светового луча. Скорость определяется путем измерения промежутка времени, за который исследуемое тело проходит некоторое фиксированное расстояние. Если бы для пассажира поезда расстояние «сжималось» или его часы шли медленнее, чем мои, то мы могли бы добиться требуемого результата измерения. Теория относительности утверждает, что именно это и происходит! Кроме того, она утверждает, что эти явления относительны, а именно, с точки зрения пассажира поезда, расстояние «сжимается» у меня, и мои часы отстают от его часов!

Эти утверждения звучали настолько абсурдно, что никто сначала не принял их всерьез. Утверждение Эйнштейна, что скорость света одинакова для всех наблюдателей, потребовало подробного анализа всех вытекающих из него следствий и тщательного разбора всех сопутствующих парадоксов. Одним из таких следствий является, например, уже давно подтвержденное экспериментально замедление хода движущихся часов. Другим следствием оказывается невозможность для любого физического тела двигаться быстрее света. Эти следствия логически вытекают из постулата об инвариантности скорости света. Эйнштейн, несомненно, заслуживает благодарности за ту отвагу и мужество, которые он проявил, решившись принять независимость скорости света от системы отсчета наблюдателя в качестве постулата,

и за ту огромную работу, которую он проделал, выводя все следствия этого постулата. Но главная его заслуга состоит в том, что он не отбросил существующие законы физики, а нашел оригинальный способ уложить картину мира в их рамки — настолько оригинальный, что на первый взгляд этот способ кажется безумным.

В следующей главе я расскажу вам об одном из взглядов на теорию Эйнштейна, который представляется мне наименее безумным. Сейчас же я хочу еще раз обратить внимание тех, кто заявляет: «Теория относительности — бред, поэтому я предлагаю собственную теорию!», на то, что Эйнштейн никогда не отвергал существующие физические законы. Напротив, он показал, что эти законы содержат нечто такое, о чем раньше никто не задумывался.

Специальная теория относительности и квантовая механика изменили нашу интуитивную картину реальности более глубоко, чем любые другие теории XX века. Эти две теории потрясли основы того, что мы обычно считаем здравым смыслом, они изменили наши представления о пространстве, времени и материи. Оставшаяся часть XX столетия была в значительной степени посвящена изучению последствий этих изменений. Для доказательства того, что теория согласуется со всеми существующими физическими принципами, зачастую требуется не меньше изобретательности и настойчивости, чем для разработки самой теории, как это, например, было в случае попытки «поженить» теорию относительности и квантовую механику, о которой я уже упоминал, рассказывая о совещании на Шелтер Айленде, когда зашла речь о рождении пар частиц и античастиц из ничего.

Хотя я уже несколько раз упоминал квантовую механику, я до сих пор не рассказывал о принципах, положенных в ее основу. Дорога к созданию квантовой механики оказалась

гораздо менее прямой, чем дорога к созданию теории относительности, из-за того что предмет ее изучения — явления, происходящие на атомном и субатомном уровне, — не был предметом нашего повседневного опыта. Тем не менее исходной точкой квантовой механики тоже является одно утверждение, которое, на первый взгляд, кажется безумным. Если я брошу мяч и моя собака поймает его в воздухе после того, как мяч пролетит десяток метров, я могу проследить весь полет мяча и убедиться, что его траектория полностью соответствует предсказаниям галилеевской механики. Однако по мере перехода ко все более малым расстояниям и временам полета мяча определенность его траектории постепенно исчезает. Законы квантовой механики утверждают, что, если объект переместился из пункта А в пункт В, мы не можем суверенностью утверждать, что он определенно находился в какой-либо точке между начальным и конечным пунктами!

На первый взгляд кажется, что мы можем легко опровергнуть это утверждение. Я могу направить луч света на объект и проследить весь путь этого луча. То же самое вроде бы относится и к электронам: поместив детектор на пути электронного пучка, летящего из А и В, мы всегда можем обнаружить электроны в любой точке прямой, соединяющей начальный и конечный пункты их путешествия.

Так какой же смысл в первоначальном утверждении, если его так легко опровергнуть? Смысл в том, что природа хитрее нас. Разумеется, мы можем обнаружить электрон между пунктами А и В, но мы не можем сделать это безнаказанно! Если, к примеру, мы направляем пучок электронов на флуоресцирующий экран, то, достигая экрана, электроны будут вызывать на нем вспышки света. Затем мы можем поставить на пути электронов непроницаемую ширму

с двумя узкими щелями, чтобы электроны могли проходить либо через одну, либо через другую щель. Для того чтобы определить, через какую из щелей проходит электрон, мы можем поставить возле каждой щели детектор. Вот тут-то и начинается самое интересное. Если мы не фиксируем, через какую из щелей проходят электроны, на экране возникает картина из светлых и темных полос, такая же, как и при прохождении через две щели луча света. Другими словами, результат получается такой, как если бы каждый электрон проходил одновременно через обе щели! Если же задействовать детекторы возле щелей, то картина на экране радикально меняется — полосы исчезают. Производя измерения, мы изменяем результат опыта! Таким образом, мы можем либо определить, через какую из щелей проходит электрон, но тогда его путь из А в В на самом деле распадается на два независимых пути: от А до одной из щелей и от этой щели до В, либо мы фиксируем электроны только в точках А и В, но тогда не имеем никакой информации, через какую щель они прошли, а электроны ведут себя так, будто прошли сразу через обе.

Поведение, подобное этому, возникает из-за того, что законы квантовой механики на фундаментальном уровне вносят неопределенность в любой процесс измерения физических величин. Например, существует принципиальное ограничение, накладываемое квантовой механикой на нашу способность одновременного точного измерения положения и скорости частицы. Чем более точно мы измеряем координату, тем менее точно нам известна скорость, и наоборот. Это происходит из-за того, что любое измерение вносит возмущение в измеряемую величину. В обычных человеческих масштабах это возмущение настолько мало, что остается незамеченным. Но в микромире им уже нельзя пренебре-

гать. Квантовая механика получила свое название из-за того, что она основана на положении, согласно которому энергия любой системы не может изменяться на произвольную сколь угодно малую величину, вместо этого она передается фиксированными порциями — пакетами, или *квантами* (от латинского слова *quantum* — количество). Эта маленькая порция энергии сопоставима с энергиями частиц в атомных системах. Когда мы пытаемся измерить какую-нибудь характеристику такой частицы, мы должны передать ей или забрать у нее некоторую фиксированную порцию энергии. Из-за того, что величина этой порции сопоставима с энергией самой частицы, после измерения характеристика частицы существенно меняется. Но если мы будем измерять какую-нибудь характеристику системы в течение очень долгого времени, то средняя энергия системы будет оставаться более-менее постоянной, даже если она претерпевает значительные колебания в течение коротких промежутков времени. Таким образом, мы приходим к еще одному *соотношению неопределенностей*: чем более точно мы хотим измерить энергию системы, тем больше времени мы должны затратить на процесс измерения.

Соотношение неопределенностей лежит в основе квантово-механического поведения. Впервые оно было выведено немецким физиком Вернером Гейзенбергом, одним из отцов-основателей квантовой механики. Гейзенберг, как и другие молодые ученые 1920-х и 1930-х годов, принял активное участие в создании новой теории. Некоторые мои коллеги настаивают на том, что своим вкладом в физику XX столетия Гейзенберг уступает только Эйнштейну. К сожалению, репутация Гейзенберга была несколько подмочена его работой на нацистскую Германию, хотя до конца неизвестно, поддерживал он нацистский режим или же,

наоборот, тайно вредил ему. Но, в отличие от ряда своих коллег, он не выступал против него открыто. В любом случае, его работы в области квантовой механики, в частности открытие принципа неопределенностей, навсегда изменили наше представление о физическом мире. Помимо физики, научные открытия XX века сильнее всего повлияли и на философию.

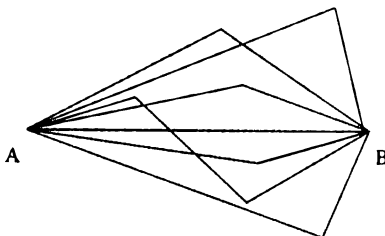
Ньютоновская механика подразумевает полный детерминизм. Законы механики предполагают, что мы способны, в принципе, с любой точностью предсказать поведение любой системы на любой наперед заданный промежуток времени, в том числе и такой сложной, как человеческий мозг, если будем знать исходные координаты и скорости всех составляющих эту систему частиц. Квантово-механическое соотношение неопределенностей радикальным образом изменило эту радужную перспективу. Если мы зададимся целью получить точную информацию о координатах всех частиц системы, мы рискуем полностью потерять информацию об их скоростях. А не зная начальных скоростей, мы не в состоянии спрогнозировать поведение всей системы во времени. Отчасти это хорошая новость, поскольку она оставляет в физике место для таких явлений, как свобода воли.

В то время как рождение квантовой механики произвело в среде нефизиков, и особенно философов, большое брожение умов, стоит отметить, что все философские следствия квантовой механики оказали очень мало влияния на физику. Все, что необходимо физикам, — это принимать правила игры. А правила таковы, что в природе существует соотношение неопределенностей. Есть много способов описать происхождение этого соотношения, но, как всегда, полностью самосогласованным является только математический

способ. Наиболее красивую математическую формулировку, которая к тому же допускает визуализацию, предложил не кто иной, как Ричард Фейнман.

Величайшим вкладом Фейнмана в физику стала формулировка квантовой механики в терминах так называемых *интегралов по траекториям*. Суть его метода та же, что и метода расчета траекторий световых лучей на основе принципа Ферма, который мы рассматривали в предыдущей главе. Этот метод сегодня используют в своей работе большинство физиков. Он включает один математический трюк, называемый *мнимым временем*, о котором, в частности, упоминает Стивен Хокинг в своей книге «Краткая история времени».

Фейнмановские интегралы по траекториям представляют собой правила для расчета квантово-механических процессов, и эти процессы в определенном смысле протекают именно таким способом. Представим себе все возможные пути, которыми частица может добраться из пункта А в пункт В:



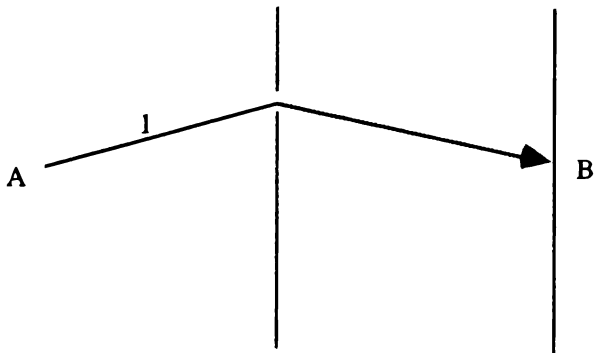
С каждым из путей связана некоторая вероятность того, что частица изберет именно его. Самая сложная часть расчета заключается в вычислении вероятности для каждого из путей и соответствующего этому пути мнимого времени, но мы

этот технический момент опустим. Для макроскопических объектов, то есть таких, размеры которых во много раз превосходят размеры атомов, вероятность одного из возможных путей оказывается практически стопроцентной, в то время как вероятностями оставшихся путей можно пренебречь. Этот путь и является той траекторией, которую предсказывают законы классической механики. Но на расстояниях, сравнимых с размерами атомов, вероятности различных путей для частицы оказываются практически одинаковыми. В этом случае вероятность того, что частица, вылетев из пункта А, попадет в пункт В, будет выражаться суммой вероятностей ее прохождения по каждому из возможных путей.

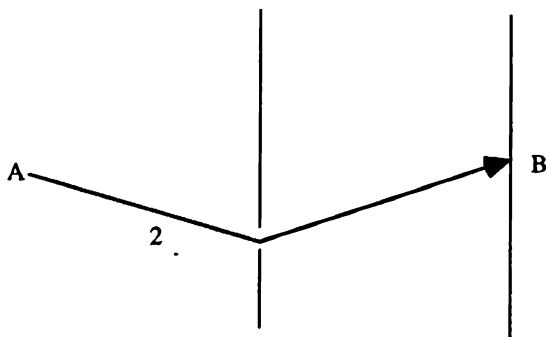
Принципиальным отличием квантовой механики от классической является то, что вероятности в квантовой механике могут быть не только числами от 0 до 1, но и отрицательными числами, и даже мнимыми. Напомню, что мнимое число получается при извлечении квадратного корня из отрицательного числа. Если вам не нравятся мнимые вероятности, вы можете избавиться от них, представив мир, где мнимым может быть время. В этом случае вероятности будут записываться положительными числами. Мнимое время в данном случае — это не что-то загадочное, а просто математическая абстракция, использование которой облегчает квантовомеханические расчеты. При вычислении окончательной вероятности попадания частицы из А в В после сложения всех вероятностей для всех возможных путей результат возводится в квадрат и, таким образом, всегда оказывается положительным действительным числом.

Важным моментом в этом расчете является то, что мы всегда можем среди возможных путей найти два таких, вероятности которых при сложении взаимно уничтожатся, то есть дадут нулевой вклад в итоговую вероятность. Именно это имеет

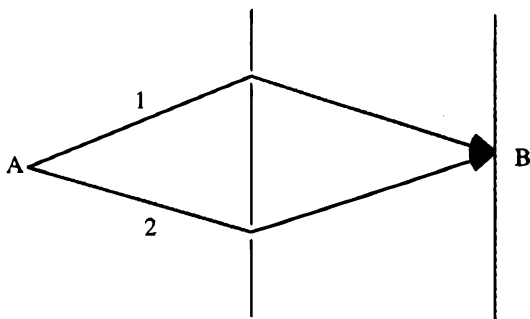
место при прохождении электрона через две щели. Давайте зафиксируем точку В на экране и закроем одну из щелей. В этом случае вероятность пути электрона из точки А в точку В будет ненулевой:



Точно так же мы получим ненулевую вероятность, если закроем другую щель:



Но если мы откроем обе щели и сложим обе вероятности, то вполне может оказаться, что их сумма будет равна нулю:



В реальном эксперименте это выглядит следующим образом: если мы оставляем открытой только одну из щелей, либо верхнюю, либо нижнюю, то наблюдаем в точке В вспышки от попадающих туда электронов. Если же мы открываем обе щели, то экран в точке В остается темным, даже если мы выпускаем электроны по одному. Электроны ведут себя так, как будто они и в самом деле проходят одновременно через обе щели! Если мы захотим узнать, как же на самом деле ведет себя электрон, и поставим возле щелей детекторы, то они будут каждый раз фиксировать, что электрон пролетел либо через одну, либо через другую щель, а в точке В на экране будут фиксироваться вспышки — мы будем получать такие же результаты, как и в том случае, когда мы закрывали одну из щелей. Значит, установка детекторов каким-то образом изменяет правила расчета вероятностей.

Я взял на себя труд описать все это в деталях не столько для того, чтобы познакомить вас с явлением, имеющим основополагающее значение на атомных масштабах, сколько для того, чтобы показать, как этот невероятный, но подтвержденный опытным путем результат приводит при включении в рассмотрение специальной теории относительности к таким следствиям, с которыми было очень трудно смириться даже тем физикам, которые впервые их вывели. Но физика

развивается именно путем проверки теорий на таких крайних случаях.

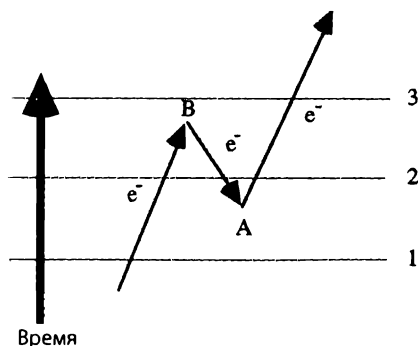
Если допустить, что электроны каким-то образом «исследуют» все доступные им траектории, а мы, в свою очередь, принципиально не можем узнать, что они делают на самом деле, то нам придется смириться с тем, что утверждение о том, возможно или невозможно какое-либо из совершаемых электроном действий, имеет смысл в том и только в том случае, если мы имеем принципиальную возможность это действие наблюдать. Например, принцип неопределенности не позволяет нам точно определить несколько последовательных положений электрона, разделенных очень малыми промежутками времени, а это означает, что мы не можем определить «мгновенную» скорость электрона. Но тогда мы должны признать, что на очень коротких промежутках времени электрон может двигаться со сколь угодно большой скоростью, и даже быстрее света, что запрещено специальной теорией относительности.

Таким образом, мы приходим к известному философскому вопросу: «Издает ли звук падающее дерево, если рядом нет никого, кто мог бы этот звук услышать?» Или в нашем случае: «Может ли частица в течение очень коротких промежутков времени превышать скорость света, если мы принципиально не можем обнаружить этот факт из-за принципа неопределенности, и более того, если этот факт вообще не имеет никаких наблюдаемых последствий?» В обоих случаях ответ: «Да».

Специальная теория относительности настолько тесно связывает пространство и время, что накладывает ограничение на максимальную скорость, которая определяется как отношение пройденного расстояния к промежутку времени, за которое оно пройдено. Одним из следствий такой связи является то, что тело, движущееся быстрее света, должно при этом двигаться вспять во времени! Это одна из причин запрета

подобных движений, в противном случае возникнет нарушение причинно-следственных связей, которое так любят эксплуатировать писатели-фантасты, например отправляя героя в прошлое, где он убивает свою бабушку, делая невозможным собственное рождение. Но квантовая механика не запрещает частицам в течение очень коротких промежутков времени двигаться быстрее света при условии, что такое движение в силу принципа неопределенности никаким способом не может быть обнаружено. До тех пор пока мы принципиально не можем измерить сверхсветовую скорость частицы, она не нарушает никаких требований специальной теории относительности. Но чтобы квантовая теория оставалась согласованной со специальной теорией относительности, в течение таких интервалов времени частица, двигаясь со сверхсветовой скоростью, должна путешествовать назад во времени.

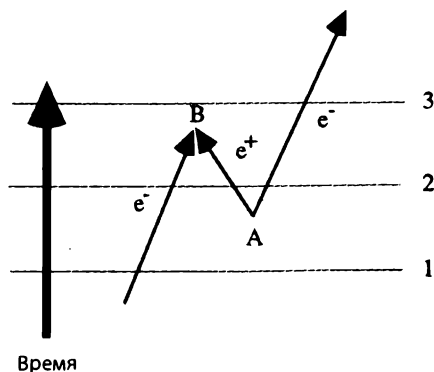
Что это означает на практике? Нарисуем траекторию электрона, как бы она выглядела с точки зрения гипотетического наблюдателя, способного фиксировать мгновенные прыжки во времени:



Этот наблюдатель обнаружит в момент времени 1 одну частицу, в момент времени 2 — три частицы и в момент вре-

мени 3 — снова одну частицу. Другими словами, количество частиц, наблюдаемых в каждый момент времени, для такого наблюдателя не сохраняется! В один момент времени он видит один электрон, а в другой у электрона вдруг появляется пара попутчиков, причем один из этих попутчиков движется вспять во времени.

Но как должен выглядеть электрон, который движется вспять во времени? Мы делаем вывод о том, что наблюдаемая частица является электроном, измеряя ее массу и электрический заряд. А как мы измеряем заряд частицы? Обычно на основании того, в какую сторону отклоняется частица в электрическом или магнитном поле. Допустим, электрон, заряженный отрицательно, отклоняется вправо. Если электрон движется вспять во времени, то наблюдатель, для которого время по-прежнему движется вперед, будет наблюдать полет этого электрона, как в запущенном в обратную сторону кинофильме, то есть он увидит частицу, которая по отношению к направлению своего движения будет отклоняться влево, как если бы эта частица имела не отрицательный, а положительный заряд. Теперь мы можем описать, что увидит наблюдатель в показанном на предыдущем рисунке случае:



С этой точки зрения картина выглядит уже не такой странной. В некоторый момент времени в точке А появляются из ниоткуда две частицы, одна из которых, так же как и электрон, заряжена отрицательно, а вторая — положительно. Положительная частица движется навстречу первому электрону и встречается с ним в точке В, где они взаимно уничтожаются, а второй электрон продолжает свое путешествие.

Как я уже говорил, никакой реальный наблюдатель не способен измерить скорость электрона между моментами времени 1 и 3 — это запрещает принцип неопределенности. Точно так же никакой реальный наблюдатель не способен обнаружить рождение частиц из ничего, равно как и измерить скорость частицы, движущейся быстрее света. Но независимо от того, можем мы или нет зарегистрировать такие процессы, квантовая механика их не запрещает. Если рождение и уничтожение частиц происходит на таких временных интервалах, когда принцип неопределенности делает невозможным их обнаружение, то никаких противоречий со специальной теорией относительности не возникает. Такие частицы называются *виртуальными*. Как я рассказывал в первой главе, подобные процессы не могут быть обнаружены путем прямых измерений, но они могут косвенно влиять на результаты других экспериментов, что и было показано Бете и его коллегами.

Уравнение, объединяющее квантовую механику и специальную теорию относительности применительно к электронам, было впервые выведено в 1928 году британским физиком Полем Адриеном Морисом Дираком, одним из отцов-основателей квантовой механики, занимавшим с 1932 по 1969 год пост Лукасовского профессора математики (в свое время этот пост занимал Исаак Ньютон, а с 1979 по 2009 год — Стивен Хокинг). Теория, объединившая квантовую механику

ку и специальную теорию относительности, получила название *квантовая электродинамика*. Она и была основной темой знаменитого совещания на Шелтер Айленде, но окончательно квантовая электродинамика сформировалась только спустя двадцать лет благодаря работам Фейнмана и его коллег.

Никакие два других физика не были столь различны меж собой, как Дирак и Фейнман. Фейнман был экстравертом, Дирак — интровертом. Отец Дирака, будучи родом из Швейцарии, преподавал в Бристоле французский язык и требовал от своего среднего сына Поля говорить дома только по-французски. Будучи не в состоянии точно и полно выразить свои мысли на французском, Поль предпочитал молчать, и эта молчаливость осталась с ним на всю жизнь.

Рассказывают, и это похоже на правду, что Нильс Бор — директор института в Копенгагене, куда поступил на работу Дирак после получения докторской степени в Кембридже, — вскоре после знакомства с Дираком посетил Эрнеста Резерфорда. Бор пожаловался Резерфорду на то, что поступивший к нему на работу молодой физик за все это время не произнес ни одного слова. В ответ Резерфорд рассказал Бору анекдот: «Стесненный в средствах покупатель заходит в магазин, чтобы приобрести попугая. Хозяин предлагает ему первого попугая красивой желто-белой расцветки, знающего 300 слов. Цена птицы — \$5000. Покупатель отказывается, тогда хозяин предлагает ему другого попугая, еще более красивого и говорящего на четырех языках, — за \$25 000. Покупатель, обескураженный ценой, оглядывается по сторонам и обращает внимание на невзрачного попугая, сидящего на жердочке в дальнем углу магазина. На вопрос, сколько стоит эта птица, следует ответ: \$100 000. “Сколько же иностранных

языков знает этот попугай”, — потрясенно спрашивает покупатель. “Ни одного, — отвечает продавец, — он вообще не разговаривает!” — “Но почему же тогда он стоит так дорого?” — “Потому что он дурает!”»

Как бы то ни было, Дирак не питал склонности к визуализации в физике. Напротив, он наиболее комфортно чувствовал себя среди уравнений и после нескольких лет работы наконец вывел замечательное уравнение, корректно описывающее релятивистское поведение электрона. Спустя какое-то время стало понятно, что это уравнение предсказывает существование частицы, эквивалентной электрону, но имеющей положительный заряд, причем она может существовать не только как виртуальная пара виртуального же электрона, но и как самостоятельная, вполне реальная наблюдаемая частица.

В то время единственной известной положительно заряженной частицей был протон. С одной стороны, уравнение Дирака прекрасно описывало необъяснимые до того атомные явления, с другой — физики в то время еще не были готовы к таким радикальным шагам, как признание существования неизвестной ранее элементарной частицы, поэтому они предпочли считать, что предсказываемая уравнением Дирака частица и есть протон. Оставалась, правда, одна загвоздка: протон в 2000 раз тяжелее электрона, в то время как из уравнения следовало, что масса новой частицы должна быть сравнимой с массой электрона.

Это был пример того, как две хорошо проверенные теории в предельном случае приводили к парадоксальным выводам. Однако, в отличие от Эйнштейна, квантовая механика в 1928 году не была готова признать, что их теория предсказывает принципиально новое явление. Ситуация пере-

ломилась в 1932 году, когда американский экспериментатор Карл Андерсон, исследуя космические лучи — потоки высокоэнергетических частиц, возникающих в результате процессов, происходящих где-то в космосе, от солнечных вспышек до взрывов сверхновых, — обнаружил нечто интересное. В числе регистрируемых им частиц оказалась частица, имеющая массу электрона и несущая положительный заряд. Это и была предсказанная Дираком частица, антиэлектрон, получивший название *позитрон*. Сегодня мы знаем, что законы квантовой механики требуют, чтобы каждой частице соответствовала своя античастица, имеющая такую же массу, но несущая противоположный электрический заряд.

Размышляя впоследствии над собственной нерешительностью в отношении предположения существования новой частицы, Дирак говорил: «Мое уравнение оказалось умнее меня!» Эта история лишней раз иллюстрирует тот факт, что развитие физики происходит не путем отбрасывания старых теорий, а путем рассмотрения предельных случаев работающих и хорошо проверенных теорий и «проталкивания» их за пределы предельных случаев с целью вывода новых следствий.

Я надеюсь, что мне удалось протолкнуть перед читателями идею проталкивания идей настолько далеко, насколько ее вообще можно протолкнуть. Но называя эту главу «Творческий плагиат», я имел в виду не только доведение старых теорий до предела применимости, но и почти полное копирование их при создании новых теорий. Например, сегодня нам известны четыре фундаментальных типа взаимодействий: гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное, и описание каждого из них в чем-то копирует описание других взаимодействий.

Начнем с ньютоновского закона всемирного тяготения. Помимо гравитации, в природе существует еще только одно «дальнодействующее» взаимодействие — электромагнитное. Замените массы в законе всемирного тяготения на электрические заряды, и вы получите закон Кулона, описывающий электростатическую силу, действующую между двумя заряженными телами. Классическая картина электрона, обращающегося вокруг протона в атоме водорода, полностью копирует картину обращения Луны вокруг Земли.

Да, электрическое взаимодействие гораздо сильнее гравитационного, и это приводит к разным масштабам описываемых законом Ньютона и законом Кулона явлений, но в остальном все законы, описывающие движение планет вокруг Солнца, применимы и к законам, описывающим движение заряженных частиц. Используя те же математические правила, которые мы применяем для того, чтобы рассчитать период обращения Луны вокруг Земли, равный одному месяцу, мы можем рассчитать период обращения электрона вокруг протона в атоме водорода, который составляет порядка 10^{-15} с. А из того, что излучаемый атомом водорода свет имеет частоту порядка 10^{15} Гц, следует заключить, что наш расчет правильный.

Разумеется, между гравитацией и электромагнетизмом существуют важные различия. Электрические заряды в природе бывают двух типов: положительные и отрицательные, поэтому электрические силы могут быть как силами притяжения, так и отталкивания. К тому же между движущимися зарядами действуют еще и магнитные силы. Как я уже говорил ранее, это приводит к тому, что движущиеся заряды излучают электромагнитные волны, к которым относится и свет. Теория электромагнетизма, объединяющая

все эти явления, в свою очередь, служит основой для теории слабого взаимодействия, которое отвечает за большинство ядерных реакций. Теории электромагнитного и слабого взаимодействий настолько похожи, что в конечном итоге были объединены в единую *электрослабую* теорию. Четвертое — сильное взаимодействие — отвечает за силы, действующие между кварками, из которых состоят протоны и нейтроны. Теория сильного взаимодействия построена по образцу квантовой электродинамики, что отражено даже в ее названии: *квантовая хромодинамика*. Наконец, имея опыт создания теорий электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий, мы можем вернуться к общей теории относительности Эйнштейна, описывающей гравитацию, и попробовать согласовать ее с квантовой механикой. Как сказал американский теоретик Шелдон Глэшоу, физика подобна Уроборосу — змее, кусающей себя за хвост.

В завершение этой главы я хотел бы привести конкретный пример, наглядно демонстрирующий, насколько сильно проникают друг в друга совершенно различные области физики. В 2007 году завершилось строительство, и начались первые опыты на супермонстр-ускорителе элементарных частиц, известном как Большой адронный коллайдер (БАК). Официальный бюджет проекта на ноябрь 2009 года составил 6 млрд долларов, не считая частных инвестиций, объем которых оценивается в 18 млрд долларов.

Любой, кто хотя бы раз видел это грандиозное сооружение, согласится с выдающимся физиком и педагогом Виктором Вайскопфом, называвшим современные ускорители готическими соборами XX века. По своим масштабам и сложности они являются для XX века тем, чем являлись инженерные проекты огромных соборов для одиннадцатого или

двенадцатого. Большой адронный коллайдер расположен примерно в тридцати метрах под поверхностью земли и представляет собой гигантскую окружность протяженностью в 27 километров. Вдоль этого кольца расположены более 6000 сверхпроводящих магнитов, направляющих два потока протонов, летящих в противоположных направлениях по туннелю и сталкивающихся при энергиях, в 7000 раз превосходящих массы протонов. Каждое такое столкновение приводит к рождению в среднем более одной тысячи частиц, а частота столкновений составляет 600 миллионов в секунду.

Целью создания этой гигантской машины была попытка понять, откуда у элементарных частиц берется масса. В настоящее время мы не знаем, почему частицы обладают массой, почему одни из них тяжелее других, а некоторые, такие как фотоны, вообще не имеют массы. Имеются достаточно весомые теоретические аргументы, что ключ к этой тайне может быть получен при энергиях, доступных на БАК.

Работа БАК критически зависит от множества сверхпроводящих магнитов, составляющих его «главный двигатель». Без этих магнитов, охлаждаемых до температур, при которых материал их катушек переходит в сверхпроводящее состояние, сооружение подобного ускорителя было бы невозможным или, по крайней мере, невысказанно дорогим. Чтобы понять, насколько глубоко взаимосвязаны БАК и явление сверхпроводимости, нам следует мысленно перенестись на сотню лет назад, в Лейден, в лабораторию голландского физика Хейке Камерлинга-Оннеса. Камерлинг-Оннес изучал свойства металлической ртути при низких температурах, в частности, измерял зависимость от температуры ее электрического сопротивления. При уменьшении температуры электрическое сопротивление металлов тоже уменьшается,

поскольку тепловое движение атомов, составляющих кристаллическую решетку, замирает, и электроны проходят через нее более свободно. Камерлинг-Оннес ожидал, что сопротивление будет монотонно падать с уменьшением температуры, но неожиданно обнаружил, что при температуре около $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопротивление вдруг скачком падает до нуля. Не просто резко уменьшается, а исчезает. Полностью исчезает! Ток, текущий через катушку из такого материала, не прекратится никогда. Камерлинг-Оннес продемонстрировал это явление очень эффектно, привезя сверхпроводящую катушку с циркулирующим в ней током из своего дома в Лейдене в Кембридж.

Сверхпроводимость оставалась загадкой почти полвека, пока в 1957 году три физика — Джон Бардин, Леон Купер и Джон Роберт Шриффер не создали его полное микроскопическое теоретическое объяснение. Бардин к тому времени уже получил одну Нобелевскую премию за участие в изобретении транзистора — ключевого компонента всей современной электроники. Нобелевская премия, которую он разделил в 1972 году с Купером и Шриффером, была уже второй. Помню, я как-то прочитал в одном из писем в физический журнал, что по иронии судьбы, когда Бардин, единственный человек, получивший две Нобелевские премии в одной и той же области, умер в 1992 году, об этом даже не сообщили по телевидению, в то время как было бы очень полезно миллионам телезрителей узнать о человеке, благодаря открытиям которого они имеют возможность смотреть свой телевизор.

Ключевая идея, приведшая к созданию теории сверхпроводимости, была сформулирована в 1930 году Фрицем Лондоном. Он предположил, что подобное странное поведение вещества может быть результатом квантово-механического эффекта, который обычно проявляется только на атомных

масштабах, внезапно проявившегося на макроуровне. Согласно его теории, электроны, ответственные за протекание электрического тока в проводнике, которые в обычных условиях ведут себя подобно неорганизованной толпе, под воздействием какого-то квантово-механического механизма вдруг начинают вести себя, как организованная армия, действуя *когерентно*, как одно целое, а это приводит к тому, что квантово-механические законы проявляются на макроуровне. Когда все электроны представляют собой единую конфигурацию, которая тянется через весь проводник, электрический ток уже нельзя рассматривать как совокупность независимых движений отдельных электронов, которые могут отскакивать от препятствий (что в обычных условиях и приводит к появлению электрического сопротивления). Это будет согласованное движение, охватывающее весь объем вещества и потому не испытывающее сопротивления. В одном состоянии эта конфигурация соответствует ансамблю электронов в состоянии покоя. В другом состоянии, которое является стабильным и не зависящим от времени, весь ансамбль электронов синхронно движется в одном направлении.

Подобное явление может иметь место только благодаря важному квантово-механическому свойству: энергия, которая может быть передана или отобрана у системы конечного размера, квантована, то есть она может передаваться только дискретными порциями. Набор возможных энергетических состояний любой частицы в системе также дискретен. Что происходит, когда у вас есть целая куча частиц в куске вещества? Если внутри этого куска имеется много свободных энергетических состояний, то частицы могут распределяться по этим состояниям весьма произвольным образом. Однако при понижении температуры

число возможных состояний уменьшается, и наступает такой момент, когда все находящиеся в куске вещества частицы вынуждены находиться в одном и том же состоянии, потому что других возможных состояний просто не осталось.

Чтобы понять, как это может произойти, рассмотрим следующую житейскую аналогию: вы смотрите кинокомедию в переполненном кинотеатре и находите ее очень смешной. Затем вы покупаете DVD с этим фильмом, чтобы еще раз посмотреть комедию дома, но она уже не кажется вам такой смешной, какой была в кинотеатре. В чем причина? Смех заразителен. Когда кто-то рядом с вами начинает оглушительно хохотать, трудно удержаться и не засмеяться вместе с ним. И чем больше людей смеются вокруг вас, тем труднее сдерживать собственный смех.

Физически же в куске вещества происходит примерно следующее: в определенной конфигурации две частицы могут образовать устойчивую пару, так что их суммарная энергия будет меньше, чем сумма энергий двух свободных частиц. Если же энергия ансамбля из трех частиц оказывается меньше, чем сумма энергий уже образовавшейся пары и свободной частицы, то к ним может присоединиться и третья частица и так далее. Подобное объединение становится возможным, только если все частицы находятся в одном и том же, самом низкоэнергетическом из всех возможных состояний. Вы, возможно, уже догадались, что произойдет дальше: довольно скоро все частицы окажутся в одном и том же квантовом состоянии, объединившись в своеобразный *когерентный конденсат*.

А дальше происходит следующее. Поскольку каждое квантовое состояние системы характеризуется собственным

дискретным значением энергии, то после того, как все частицы окажутся в одном и том же квантовом состоянии, энергия этого состояния при определенных обстоятельствах может оказаться гораздо меньшей, чем энергия состояния, в котором все частицы объединены, а одна свободна. Этот энергетический разрыв, или, как его называют, *потенциальный барьер* между двумя ближайшими состояниями системы, может быть очень большим. Именно в такой ситуации и возникает сверхпроводимость.

Несмотря на то что каждый электрон заряжен отрицательно и между электронами действует сила электростатического отталкивания, внутри кристаллической решетки на электроны действует также и сила притяжения со стороны атомных ядер, которая не дает электронам вылететь из кристалла. При низкой температуре, когда энергия теплового движения электронов очень мала по сравнению с энергией связи кристаллической решетки, электроны начинают объединяться в пары, которые, в свою очередь, образуют единый когерентный электронный конденсат. Если теперь подать на кристалл разность потенциалов, то есть подключить его к электрической батарее, электронный конденсат начнет двигаться как единое целое. Если любой из электронов сталкивается с препятствием, то энергия, необходимая, чтобы остановить этот электрон, то есть выбить его из когерентного ансамбля, оказывается гораздо больше энергии этого электрона. Электрон не в состоянии преодолеть потенциальный барьер и выскочить из ансамбля, поэтому он вынужден продолжать движение вместе со всеми остальными электронами. Таким образом, все электроны синхронно перемещаются в одном направлении, а кристаллическая решетка не оказывает их движению никакого сопротивления.

На основании описанного поведения электронного конденсата можно попытаться сделать ряд предсказаний относительно свойств сверхпроводящих материалов. Одно из таких свойств носит название *эффекта Мейснера*. Немецкий физик Вальтер Мейснер обнаружил его в 1933 году. Суть эффекта заключается в том, что если поместить сверхпроводник рядом с магнитом, то сверхпроводник будет прилагать все усилия, чтобы не пустить внутрь себя магнитное поле. Это происходит вследствие того, что электроны в сверхпроводнике, не встречая никакого сопротивления, перемещаются под действием магнитного поля так, чтобы создаваемое в результате их движения собственное магнитное поле полностью компенсировало внешнее. Фактически собственное магнитное поле присутствует только на поверхности сверхпроводника и имеет такую конфигурацию, чтобы суммарное поле внутри кристалла оставалось равным нулю.

Таким образом, если поднести к сверхпроводнику магнит, сверхпроводник сформирует у себя на поверхности магнитное поле, являющееся точным отражением магнитного поля подносимого магнита. В результате этого эффекта магнит, приближающийся к сверхпроводнику, «увидит» магнит одинаковой полярности и точно такого же размера. Если магнит повернут к сверхпроводнику, например, северным полюсом, то его отражение тоже будет повернуто к магниту северным полюсом. На этом эффекте основан замечательный демонстрационный опыт: на кусок вещества кладется магнит, затем вещество охлаждается до сверхпроводящего состояния, и магнит начинает отталкиваться от сверхпроводника и воспаряет над ним подобно гробу Магомета.

Существует еще один способ описания этого явления. Свет, как я уже отмечал ранее, представляет собой не что иное, как электромагнитные волны. Покачивание заряда или перио-

дическое изменение электрического или магнитного полей порождает электромагнитные волны. Электромагнитные волны распространяются со скоростью света, потому что этого требуют законы электромагнетизма, но именно по этой причине, несмотря на то, что электромагнитная волна может переносить энергию, с ней невозможно связать никакую массу. На квантовом уровне электромагнитная волна представляется набором частиц, называемых *фотонами*, которые также не имеют массы.

Магнитное поле не может проникнуть внутрь сверхпроводника, потому что фотоны, соответствующие на микроуровне этому макроскопическому полю, пытаясь пройти сквозь строй когерентных электронов, изменяют свои свойства. Они начинают вести себя так, как если бы они имели массу! Ситуация аналогична попытке проехать на роликах по песку. Пока вы едете по асфальту, ролики катятся свободно, но стоит вам съехать на рыхлый песок, как колеса начинают в нем вязнуть. Если кто-нибудь будет вас толкать, то он почувствует, что вы как будто стали гораздо тяжелее, съехав с асфальта на песок. Примерно то же самое происходит и с фотонами, которым гораздо труднее двигаться в сверхпроводнике из-за «налипшей» на них *эффективной массы*. В результате фотоны не проникают вглубь сверхпроводника, и магнитное поле остается только на его поверхности.

Наконец мы готовы вернуться к Большому адронному коллайдеру. Как я сказал, этот монстр был построен для того, чтобы узнать, почему все элементарные частицы имеют массу. Прочитав предыдущие несколько страниц, вы можете подумать, что эти две темы никак друг с другом не связаны, но на самом деле вполне вероятно, что решение загадки масс элементарных частиц аналогично причине, по

которой сверхпроводящие материалы выталкивают магнитные поля.

Я уже говорил, что теория электромагнетизма послужила моделью для теории слабого взаимодействия, отвечающего за протекание ядерных реакций, обеспечивающих светимость солнца или дающих энергию атомным электростанциям. Электромагнитное и слабое взаимодействия почти идентичны, за исключением одного важного математического различия. Фотон, представляющий собой квантовую сущность электромагнитных волн, является безмассовым. Частицы, ответственные за передачу слабого взаимодействия, наоборот, массивны. По этой причине слабое взаимодействие между протонами и нейтронами в ядре является настолько *короткодействующим*, что никогда не простирается за пределы ядра, в то время как электрические и магнитные силы являются *дальнодействующими* и действуют на больших расстояниях.

Как только указанный факт был обнаружен, физики тут же принялись выяснять, чем может быть вызвано это различие. Возможным ответом может служить механизм, аналогичный тому, который отвечает за странное поведение сверхпроводников. Я ранее рассказывал о тех странных явлениях, которые могут происходить в мире элементарных частиц, совместно описываемом специальной теорией относительности и квантовой механикой. В частности, пустое пространство в таком мире никогда не бывает по-настоящему пустым. Оно заполнено виртуальными частицами, которые постоянно появляются и исчезают слишком быстро, чтобы быть обнаруженными. В главе 1 я упомянул, что процессы постоянного рождения и уничтожения виртуальных частиц приводят к вполне наблюдаемым эффектам, таким как лэмбовский сдвиг.

Настало время собрать все части пазла вместе. Если виртуальные частицы ответственны за тонкие, но вполне измеримые аномалии в физических процессах, то не могут ли они нести ответственность и за какие-либо свойства реальных элементарных частиц?

Представьте себе, что в природе существует некий тип частиц, которые очень сильно взаимодействуют между собой. Если пара таких виртуальных частиц рождается из вакуума, то в силу закона сохранения энергии они должны быстро исчезнуть. Однако если эти частицы притягиваются друг к другу, то энергетически выгодным может оказаться рождение не одной, а сразу двух пар частиц. Но если две пары лучше, чем одна, то почему не три? И так далее. Это может привести к тому, что суммарная энергия, необходимая для рождения когерентного ансамбля таких частиц, будет тем меньше, чем больше частиц в ансамбле. Тогда вполне возможна ситуация, когда все «пустое» пространство окажется заполненным когерентным конденсатом подобных частиц, находящихся в одном квантовом состоянии.

Каким будет эффект такого явления? Понятно, что не следует ожидать рождения реальных частиц в пустом пространстве, потому что для рождения одной реальной частицы может потребоваться очень большая энергия, точно так же, как требуется большая энергия для выбивания одного электрона из когерентного ансамбля в сверхпроводнике. Вместо этого можно ожидать изменения свойств других реальных частиц, движущихся сквозь кипящее виртуальное море.

Можно построить простую модель, которая бы объясняла, почему это виртуальное море взаимодействует с частицами-переносчиками слабого взаимодействия, называемыми W и Z бозонами, но не взаимодействует с фотонами. В такой

модели W и Z бозоны вели бы себя так, как если бы они обладали большой массой, а фотоны остались бы безмассовыми. Это позволило бы утверждать, что реальная причина различия между слабым и электромагнитным взаимодействием кроется не во внутренней природе частиц, а в универсальном когерентном виртуальном море, по которому перемещаются переносчики взаимодействия.

Эта гипотетическая аналогия между тем, что происходит с магнитным полем в сверхпроводнике, и тем, что определяет основные свойства материи, может показаться слишком фантастической, чтобы быть правдой, но у нее есть одно несомненное достоинство: она правильно описывает результаты всех экспериментов, поставленных к настоящему времени. В 1984 году были экспериментально обнаружены W и Z бозоны. Их характеристики находятся в идеальном согласии с предсказаниями, базирующимися на описанном механизме.

Тогда, наверное, имеет смысл идти дальше? Как насчет масс обычных частиц, таких как протоны и электроны? Можем ли мы надеяться описать и их как результат взаимодействия с когерентным квантовым морем, заполняющим пустое пространство? Если это так, то в основе происхождения масс всех частиц должен лежать тот же самый механизм. Как это выяснить? Очень просто: предположив существование частиц, называемых *бозонами Хиггса* — в честь шотландского физика Питера Хиггса, впервые предсказавшего их существование в 1964 году, — образующих аналогичное виртуальное море. Одной из приоритетных задач БАК и было обнаружение бозонов Хиггса, успешно состоявшееся в 2012 году. За это предсказание Питер Хиггс и его коллега Франсуа Энглер в 2013 году были удостоены Нобелевской премии.

Следует заметить, что описанная картина вовсе не требует, чтобы бозон Хиггса был фундаментальной элементарной частицей, как электрон или кварк. В итоге может оказаться, что он состоит из других частиц, объединяющихся в пары, подобно тому как спариваются электроны, образуя когерентный конденсат, ответственный за сверхпроводимость. Почему вообще существует бозон Хиггса? Может быть, имеется более фундаментальная теория, которая объясняет его существование, а заодно и существование электронов, кварков, фотонов, W и Z бозонов? Мы сможем ответить на эти вопросы, только ставя все новые и новые эксперименты.

Я лично не представляю, как можно не испытывать восторга перед этим поразительным дуализмом между физикой сверхпроводимости и возможностью объяснения происхождения массы во Вселенной. Но интеллектуальная оценка чего-то и желание заплатить реальные деньги за то, чтобы это что-то изучить, это разные вещи. Стоит напомнить, что БАК строился более десяти лет и обошелся более чем в 10 миллиардов долларов. В действительности, вопрос о том, стоило ли строить БАК, это не научный вопрос — ни один ученый ни на минуту не усомнится в необходимости такой машины. Это вопрос политический: можем ли мы позволить себе делать такие вещи приоритетными в условиях ограниченных ресурсов?

Как я подчеркнул в начале этой книги, на мой взгляд, искать оправдания для занятия наукой и создания таких дорогостоящих инструментов, как БАК, следует не в технологической, а в культурной области. Мы ведь обычно не обсуждаем особенности устройства канализации в Древней Греции, но мы помним о научных и философских достижениях античных ученых. Они отфильтровываются сегодняшней массовой

культурой, ложась в основания общественных институтов и методов, используемых для обучения нашей молодежи. Обнаружение частицы Хиггса не изменит нашу повседневную жизнь. Но я уверен, что картина, частью которой она является, окажет огромное влияние на будущие поколения, пробуждая в некоторых молодых людях жгучее любопытство и заставляя их выбирать научную карьеру.

Когда основателя и первого директора Лаборатории Ферми Роберта Вильсона спросили, поможет ли строительство крупнейшего в мире ускорителя элементарных частиц повысить обороноспособность США, он ответил: «Нет. Но это поможет сохранить за США статус страны, которую стоит защищать».

Глава 4

СКРЫТАЯ РЕАЛЬНОСТЬ

Мы не оставим поиск,
Мы придем в конце
В то место, из которого ушли, —
Но место не узнаем.

*Томас Стернз Элиот, «Четыре
квартета, Литтл Гиддинг»
(Перевод В. И. Постникова)*

Вы просыпаетесь однажды морозным утром и смотрите в окно, но не узнаете знакомый пейзаж. Мир полон нечетких узоров. В какой-то момент вы вдруг осознаете, что смотрите на морозный узор на стекле, причудливым образом преломляющий и рассеивающий солнечный свет.

Психологи называют это *ага-переживанием*. У мистиков, вероятно, имеется для него другое название. Внезапное изменение мира, этот новый гештальт, когда разрозненные, на первый взгляд, факты соединяются вместе, чтобы сформировать новую картину, заставляя вас увидеть старые вещи в совершенно новом свете, играет важнейшую роль в раз-

витии физики. В какой-то момент, возвращаясь к уже давно решенной задаче, мы обнаруживаем что-то, на что раньше не обращали внимания: новый пласт, скрываемый под покровом обманчивой простоты, новые связи между, казалось бы, не связанными друг с другом вещами.

Все важнейшие достижения в физике XX века обязаны именно таким озарениям: от поразительных открытий Эйнштейна, касающихся пространства, времени и устройства Вселенной, до моделирования процесса кипения овсяной каши. При обсуждении этой «скрытой реальности» я не хотел бы увязнуть в философских спорах о совершенстве и бесконечности природы. Дискуссии подобного рода лишь укрепляют меня в моем отношении к философии, которое лучше всего сформулировал один из крупнейших философов XX века Людвиг Витгенштейн: «Большинство предложений и вопросов, трактуемых как философские, не ложны, а бессмысленны»¹.

Платоновский вопрос о существовании объективной реальности, не зависящей от наших возможностей ее ощущать, можно обсуждать бесконечно. Тем не менее мне хотелось бы воспользоваться аллегорией платоновской пещеры, отчасти чтобы показать, какой я начитанный, но в основном потому, что она очень удобна для популяризации некоторых важных идей.

Платон сравнивал наше место в Великом порядке вещей с положением человека, живущего в пещере и имеющего возможность наблюдать только тени, отбрасываемые реальными предметами на ее стены. Он утверждал, что мы, подобно такому человеку, обречены лишь слегка «царапать»

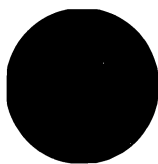
¹ Ludwig Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus* (London: Routledge and Kegan Paul, 1958).

поверхность реальности, поскольку наши органы чувств ограничены и не позволяют проникнуть вглубь природы вещей.

Можно представить себе трудности, с которыми сталкивается платоновский пещерный человек. Тени дают ему, в лучшем случае, плоскую проекцию реального мира. Но иногда на исследователя находит неожиданное озарение. Предположим, что каждым воскресным вечером перед закатом солнца он видит на стене пещеры тень следующей формы:

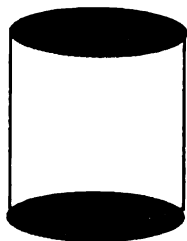


А вечером каждого понедельника тень выглядит так:



Несмотря на то что наблюдаемая в понедельник тень подозрительно похожа на тень сферического коня, человек подозревает, что на самом деле не все так просто. Неделю за неделей одни и те же тени появляются на стене пещеры с регулярностью хорошего часового механизма. Наконец, в один из понедельников наш троглодит просыпается раньше обычного и слышит звук разворачивающегося грузовика и звон металла. Обладая незаурядной силой воображения и хорошими математическими способностями, он внезапно понимает, что эти тени принадлежат не разным, а одному

и тому же предмету! Добавив в свою картину мира новое измерение, узник пещеры представляет себе цилиндрический мусорный контейнер:



В воскресенье вечером контейнер стоит вертикально и отбрасывает на стену пещеры прямоугольную тень. В понедельник, будучи опрокинутым набок, тот же контейнер отбрасывает круглую тень. Трехмерный объект, рассматриваемый с разных сторон, может иметь различные двухмерные проекции. Пережив подобный инсайт, наш герой оказывается счастлив вдвойне: мало того, что он решил головоломку с формой теней, так он еще и обрел понимание, что различные явления могут быть различными проявлениями одной и той же сущности.

Развитие физики не происходит по принципу: «чем дальше в лес, тем больше дров» — более сложные выводы не всегда следуют из более простых предпосылок. Чаще всего новые открытия являются отражением внезапных озарений, приводящих к смене точки зрения, как в примере выше. Иногда скрытая реальность обнажается при объединении разнородных идей, что приводит к появлению одной теории вместо прежних двух. А иногда независимые ранее физические величины обнаруживают тесную связь, открывая новые горизонты исследований.

Одно такое соединение разнородных, как ранее представлялось, явлений ознаменовало начало эры современной физики, когда Джеймс Клерк Максвелл представил миру свою теорию электромагнетизма, а вместе с ней и объяснение природы света. Вполне логично, что первым творением Бога, по Библии, был свет. Со света началась и история современной физики. Странное поведение света заставило Эйнштейна задуматься о новых отношениях между пространством и временем. Тот же свет, а именно необъяснимое с позиций классической физики явление фотоэффекта привело к появлению квантовой механики. Наконец, квантовая механика в середине XX века легла в основу нашего нынешнего представления о природе всех известных в природе сил, в том числе в основу объединения электромагнитного и слабого взаимодействия. Понимание природы света родилось из предположения, что две очень разные силы — электрическая и магнитная — на самом деле представляют собой две стороны одного явления.

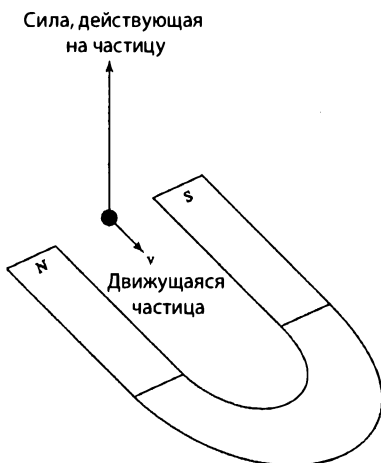
Я уже рассказывал об истории открытия Фарадеем и Генри связи между электричеством и магнетизмом, но мне кажется, эта история не раскрывает всю глубину этой связи так, как мне бы хотелось. Поэтому я предлагаю провести мысленный эксперимент, показывающий, что электричество и магнетизм это одно и то же. Насколько я знаю, этот мысленный эксперимент никогда не ставился, если можно так сказать о мысленном эксперименте, до фактического открытия связи между электричеством и магнетизмом, хотя в ретроспективе он выглядит очень простым.

Мысленные эксперименты являются неотъемлемой частью работы физиков, потому что они позволяют одновременно «наблюдать» явления с разных точек зрения. Вспомните классический фильм Акиры Куросавы «Расёмон», в котором

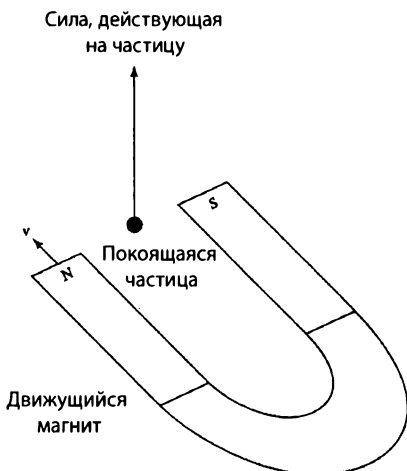
одно и то же событие интерпретировалось каждым из свидетелей по-своему, но каждая из точек зрения дополняла общую картину, давая ключ к восстановлению объективной истины. Поскольку один наблюдатель не может обладать двумя точками зрения на наблюдаемое событие, физики используют стандартную схему мысленного эксперимента с несколькими независимыми наблюдателями, придуманную еще Галилеем и доведенную до совершенства Эйнштейном.

Для постановки этого мысленного эксперимента нам необходимо знать два факта. Во-первых, единственной силой, помимо гравитации, которую «чувствует» заряженная частица, находящаяся в состоянии покоя, является *кулоновская сила* электростатического притяжения или отталкивания. Вы можете поместить сильный магнит рядом с покоящейся частицей, но она ничего «не заметит». Во-вторых, если частица движется в магнитном поле, она испытывает силу, стремящуюся изменить направление ее движения. Эта сила называется *силой Лоренца* — в честь голландского физика Генриха Лоренца, ближе всех предшественников Эйнштейна подошедшего к созданию специальной теории относительности. Эта сила обладает весьма своеобразным поведением. Если заряженная частица движется горизонтально между полюсами магнита, как показано на следующем рисунке (с. 154), сила Лоренца действует на нее перпендикулярно направлению движения.

Этих двух фактов достаточно, чтобы прийти к выводу, что кулоновская сила для одного наблюдателя является силой Лоренца для другого, а электричество и магнетизм тесно связаны друг с другом, как круг и прямоугольник на стене пещеры. Посмотрим еще раз на предыдущий рисунок. неподвижный наблюдатель видит покоящийся магнит и движущуюся частицу, на которую действует магнитная сила



Лоренца. А теперь представьте себя на месте наблюдателя, движущегося вместе с частицей. В этом случае частица будет по отношению к вам неподвижна, а двигаться будет магнит, и вы увидите следующую картину:



Поскольку покоящаяся заряженная частица может «чувствовать» только электрическую кулоновскую силу, то сила, действующая на частицу, с его точки зрения, должна быть электрической. Кроме того, согласно принципу относительности Галилея законы физики не должны различаться для двух наблюдателей, движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью. Согласно этому принципу, у нас нет никакой возможности определить, что на самом деле движется, а что покоится: частица или магнит. Все, что мы можем сказать, это то, что магнит и частица движутся *относительно* друг друга.

Но мы только что заключили, что в случае покоящегося магнита и движущейся частицы на последнюю должна действовать сила Лоренца, отклоняющая частицу вверх. В случае же, когда частица покоится, сила, действующая на нее, должна быть электрической. Откуда она берется? Видимо, с точки зрения второго наблюдателя, именно так проявляет себя магнитная сила, которую фиксирует первый наблюдатель, то есть электричество и магнетизм проявляют себя как различные «тени» одной и той же *электромагнитной* силы!

Вернемся теперь в сегодняшний день и посмотрим, как в свете вышеизложенных принципов выглядят последние достижения современной физики. Когда я рассказывал об удивительной связи между сверхпроводниками и суперколлайдерами, я говорил, что происхождение масс элементарных частиц может быть связано с их взаимодействием с глобальным морем виртуальных частиц, которое «тормозит» их, создавая такой же эффект, как наличие массы в классической механике. Я также говорил, что то же самое происходит со светом в сверхпроводнике. Если бы мы жили внутри сверхпроводника, мы бы воспринимали фотон — переносчик света — как частицу, обладающую массой,

потому что не догадывались бы, что единственная причина, по которой фотон ведет себя как массивная частица, заключается в его взаимодействии с материей, находящейся в определенном состоянии.

Как, будучи узниками метафорической сверхпроводящей пещеры, мы смогли бы догадаться о существовании подобного механизма возникновения массы фотона и подтвердить справедливость наших выводов, не имея возможности посмотреть на сверхпроводник извне? Я не уверен, существует ли какое-нибудь универсальное правило, но, когда происходит «щелчок в мозгу» и все части пазла складываются вместе, мы скачкообразно переходим на новый уровень понимания связи между казавшимися ранее несвязанными явлениями и приходим к заключению, что, по-видимому, сделали правильный выбор.

Такой «скачок» в физике элементарных частиц начался в конце 1950-х и закончился в начале 1970-х годов. Постепенно стало ясно, что квантовая электродинамика, добиться завершения которой удалось после совещания на Шелтер Айленде, могла бы быть взята за образец для построения еще более общей квантовой теории, описывающей все известные фундаментальные взаимодействия. Как я уже писал ранее, математический аппарат квантовой электродинамики и теории слабого взаимодействия, отвечающего за большинство ядерных реакций, очень похож. Единственное отличие заключается в том, что переносчики слабого взаимодействия являются массивными частицами, а переносчики электромагнитного взаимодействия — безмассовыми. И в 1961 году Глэшоу продемонстрировал, что эти две разные силы действительно могут быть соединены в одной теории, в которой электромагнитное и слабое взаимодействия оказываются разными проявлениями одной и той же сущности. Но оста-

вался нерешенным вопрос, почему фотон не имеет массы, а переносчики слабого взаимодействия — W и Z бозоны — имеют.

Однако после того, как было признано, что само пространство способно действовать как огромный «сверхпроводник», в том смысле, что фоновое поле виртуальных частиц может приводить к возникновению эффективных масс у движущихся сквозь него реальных частиц, Стивен Вайнберг и независимо от него Абдус Салам в 1967 году доказали, что именно это и происходит с W и Z бозонами.

Интересно здесь не само открытие механизма возникновения масс у W и Z бозонов, а то, что в отсутствие такого механизма электромагнитное и слабое взаимодействия оказываются лишь различными проявлениями одного и того же физического явления. Еще раз: наблюдаемое различие между этими двумя взаимодействиями в значительной степени — результат стечения обстоятельств. Если бы мы не жили в пространстве, заполненном когерентным ансамблем виртуальных частиц в определенном квантовом состоянии, электромагнитное и слабое взаимодействия выглядели бы для нас одинаково. Они представляются нам в виде различных теней на стене пещеры, скрывая свою истинную природу за пределами прямых свидетельств наших органов чувств.

В 1971 году голландский физик Герард 'т Хоофт, еще будучи аспирантом, показал, что механизм возникновения масс W и Z бозонов является математически и физически согласованным. В 1979 году Глэшоу, Салам и Вайнберг удостоились за свою теорию Нобелевской премии, а 1984 году W и Z бозоны были обнаружены экспериментально на большом ускорителе в ЦЕРНе, и их массы очень хорошо совпали с предсказанными. Наконец, в 1999 году получил Нобелевскую премию и сам 'т Хоофт, который вместе со своим

научным руководителем Мартинусом Вельтманом показал, что теория Глэшоу—Вайнберга—Салама самосогласованна.

Но этим результатом дело не ограничилось. Успех объединения слабого и электромагнитного взаимодействий в единую силу, получившую название *электрослабого* взаимодействия, оказался сильным искушением для физиков попытаться таким же образом свести воедино все известные фундаментальные взаимодействия. Теория сильного взаимодействия, разработанная после теоретического открытия асимптотической свободы, о которой я рассказывал в главе 1, имеет точно такую же общую форму, как и электрослабая теория. Теории подобного типа получили название *калибровочных*. Это название тоже имеет историю, связанную с попытками рассмотрения разных сил как различных проявлений одной и той же физической сущности.

Еще в 1918 году физик и математик Герман Вейль, обратив внимание на сходство уравнений гравитационного и электромагнитного поля, предположил, что гравитация и электромагнетизм могут быть сведены в единую теорию. Он назвал объединяющую их особенность *калибровочной симметрией*, связанной с тем, что в общей теории относительности, как мы вскоре увидим, калибровка, или масштаб шкал измерительных приборов, используемых различными наблюдателями, может быть произвольно изменен, и это изменение не сказывается на общем характере законов гравитации.

Математически то же самое происходит и при измерении различными наблюдателями величины электрического заряда в электродинамике. Вейль попытался связать таким способом классическую электродинамику и гравитацию, но не преуспел в этом. Однако созданный им математический аппарат оказался востребован при создании квантовой элек-

тродинамики, и калибровочная симметрия легла в основу теории слабых и сильных взаимодействий. Сегодня калибровочная симметрия является ключевой идеей большинства попыток создания квантовой теории гравитации и объединения ее с другими взаимодействиями.

Электрослабая теория и основанная на асимптотической свободе теория сильного взаимодействия вместе образовали так называемую *Стандартную модель* физики элементарных частиц. Все эксперименты, поставленные за последующие двадцать лет, находились в прекрасном согласии с этими теориями. Все, что оставалось сделать для окончательного объединения слабого и электромагнитного взаимодействий — это открыть истинную природу когерентного квантового состояния окружающего нас моря виртуальных частиц, ответственных, как предполагалось, за возникновение масс W и Z бозонов. Попутно было бы неплохо, чтобы тот же механизм отвечал и за возникновение масс всех остальных частиц. Самые большие надежды в этом деле возлагались на БАК.

Как физик-теоретик я был буквально потрясен этой сверкающей, в каком-то смысле даже эзотерической реальностью, скрытой под миром элементарных частиц. С другой стороны, из разговоров со своей женой я знаю, что для большинства людей подобная реальность выглядит слишком далекой от повседневной жизни, чтобы потрясти их воображение, несмотря на то что сам факт нашего существования неразрывно связан с этой скрытой реальностью. Если известные частицы не будут иметь в точности те массы, которые они имеют, например, если нейтрон не будет на одну тысячную тяжелее протона, жизнь в том виде, в котором она нам известна, не сможет существовать. Из-за того что протон легче нейтрона, он стабилен, по крайней мере в масштабах

времени существования Вселенной. Водород, состоящий из одного протона и одного электрона, самый распространенный химический элемент во Вселенной, являющийся топливом для звезды и, наряду с углеродом, — основным элементом органических молекул, тоже стабилен благодаря стабильности протона. Кроме того, если разность масс нейтрона и протона будет чуть больше, чем она есть, это нарушит хрупкое равновесие ядерных реакций на ранних стадиях существования Вселенной, благодаря которому образовалось большинство легких элементов. Легкие элементы сыграли ключевую роль в эволюции звезд первого поколения, из остатков которых спустя 5–10 миллиардов лет сформировались звезды второго поколения, в число коих входит и наше Солнце, а также планеты и наши собственные тела. Я никогда не перестаю удивляться тому, что каждый атом в моем теле когда-то родился в недрах звезд первого поколения или при взрывах далеких сверхновых. Мы в буквальном смысле являемся детьми звезд! Указанная разность масс элементарных частиц определяет и ход термоядерных реакций в ядре Солнца, обеспечивающего нас необходимой для жизни энергией. Наконец, вес, измеряемый напольными весами в вашей ванной комнате, определяется суммой масс всех элементарных частиц, из которых вы состоите.

Как ни сильна связь между царством частиц и нашим собственным, развитие физики XX века происходило не только в направлении изучения явлений, находящихся вне нашего прямого восприятия. Поэтому вернемся из микромира к более привычным масштабам.

Что может быть более непосредственным для восприятия, чем пространство и время? Они образуют главную часть человеческого когнитивного окружения. Наиболее характерные особенности поведения животных выражаются

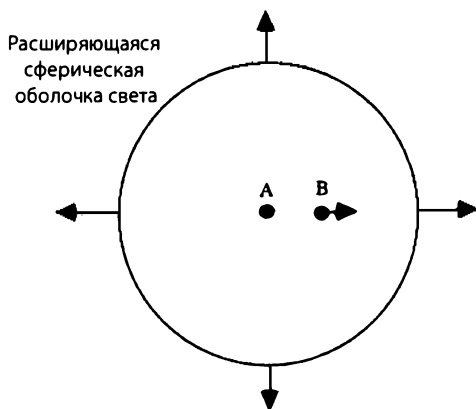
в пространственно-временных изменениях. Например, котенок совершенно спокойно гуляет по листу оргстекла, закрывающему люк, но до определенного возраста, начиная с которого кошки начинают воспринимать пустое пространство под ногами как опасность. Тем более удивительно, что мы открыли тесную связь между пространством и временем только в начале XX века, и до этого никто о такой связи даже не подозревал. Мало кто возьмется оспаривать, что обнаружение Альбертом Эйнштейном такой связи и создание специальной и общей теории относительности является одним из выдающихся интеллектуальных достижений нашего времени. Метафорически его открытие поразительно похоже на озарение обитателя Платоновой пещеры.

Как уже говорилось, Эйнштейн хотел согласовать уравнения Максвелла с принципом относительности. Напомню, что в теории Максвелла скорость света может быть получена из двух фундаментальных констант, одна из которых определяет силу электрического взаимодействия между двумя зарядами, а другая — силу магнитного взаимодействия между двумя магнитами. Принцип относительности Галилея подразумевает, что эти константы должны быть одинаковыми для любых двух наблюдателей, движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью. Но это также означает, что любой наблюдатель должен при измерении скорости света получать одно и то же значение, независимо от того, как он движется относительно источника света. Таким образом, Эйнштейн пришел к первому постулату теории относительности: *скорость света в пустом пространстве является универсальной константой, и она не зависит ни от скорости источника света, ни от скорости наблюдателя.*

Интуитивная абсурдность этого постулата будет более очевидной, если привести аналогию с выборами в США. Пред-

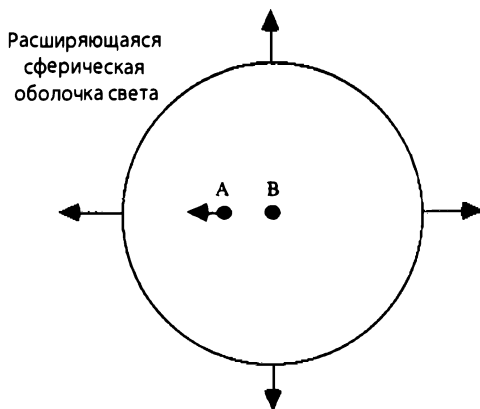
ставьте себе, что республиканцы набирают на выборах в конгресс более 50 % голосов, и одновременно с ними демократы тоже набирают более 50 % голосов. Причем общее количество набранных обеими партиями голосов составляет 100 %. Постулат Эйнштейна, на первый взгляд, приводит к похожему абсурдному следствию.

Представьте себе двух наблюдателей, которые движутся навстречу друг другу, и в момент их встречи в точке, где они встречаются, загорается лампа. Сферическая оболочка света начинает распространяться из этой точки во всех направлениях, освещая мрак. Свет распространяется так быстро, что мы обычно не замечаем этой расширяющейся сферы, разделяющей свет и тьму, но предположим, что мы ее видим. Наблюдатель А, покоящийся относительно лампочки, спустя несколько наносекунд увидит следующую картину:



Он обнаружит себя в центре световой сферы, а наблюдатель В, движущийся по отношению к нему вправо, сместится за эти несколько наносекунд на некоторое расстояние.

Со своей стороны наблюдатель В будет наблюдать расширяющуюся световую сферу, видя, что он находится в ее центре, поскольку, согласно первому постулату Эйнштейна, свет распространяется одинаково относительно любого наблюдателя, независимо от того, как движется этот наблюдатель. Таким образом, он будет видеть себя в центре сферы, а наблюдатель А относительно него и центра сферы сместится влево:



Другими словами, оба наблюдателя обнаружат себя в центре сферы. Интуиция говорит нам, что это невозможно. Но оба наблюдателя действительно находятся в центре! Это прямое следствие первого постулата.

Как такое может быть? Только если пространство и время для каждого наблюдателя выглядят по-разному. В то время как один из наблюдателей видит, что расстояние между ним и всеми точками расширяющейся световой сферы одинаковое, для другого наблюдателя (с точки зрения первого) расстояние между ним и световой сферой в одном направлении

отличается от расстояния в другом направлении. Абсолютность пространства и времени была заменена Эйнштейном на абсолютность скорости света. Все парадоксы теории относительности в действительности возникают из-за того, что наши сведения об удаленных событиях могут быть только косвенными. Мы не можем находиться «здесь» и «там» в одно и то же время. Единственным способом узнать, что происходит «там», является получение «оттуда» какого-то сигнала, который не может распространяться быстрее света, поэтому мы не можем получить информацию о том, что происходит «там» «сейчас». Когда мы «сейчас» получаем сигнал «оттуда», он приносит нам информацию о том, что было «там» «тогда».

Большинство из нас не привыкли воспринимать происходящие в мире события с такой позиции, потому что скорость света очень велика, а наша пронизательная интуиция шепчет, что событие, которое мы видим, происходит «сейчас». Но это просто особенность нашего восприятия. Тем не менее эта особенность настолько сильна, что, не имея Эйнштейн серьезных оснований задуматься о странном поведении света, которое следует из электродинамики Максвелла, он вряд ли разглядел бы связь между пространством и временем в той тени на стене «пещеры», которую мы называем словом «сейчас».

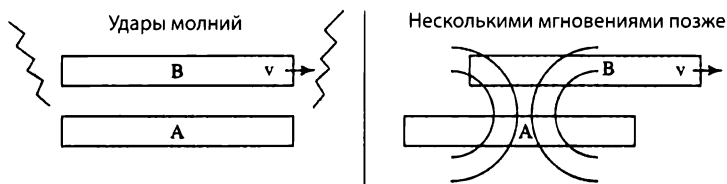
Когда вы фотографируете какую-нибудь сцену из жизни, вы обычно воспринимаете полученный результат как моментальный, единовременный слепок: собака прыгнула на Лили, в то время как та танцевала. Однако это не совсем верно. Снимок представляет собой слепок, но не единовременный. Свет от разных объектов попал в камеру в разные моменты времени, поскольку эти объекты находились на разных расстояниях от камеры. По этой причине фотография пред-

ставляет собой не единый временной срез, а скорее нарезку событий, происходивших в разных точках пространства в разное время.

Эта «времениподобная» природа пространства обычно оказывается за пределами нашего повседневного опыта из-за колоссального различия скоростей, с которыми мы обычно имеем дело, и скоростью света. Например, за одну сотую долю секунды — характерное время выдержки при фотографировании — свет успевает преодолеть около 3000 километров — расстояние от Москвы до Барселоны! Тем не менее, даже несмотря на то, что на большинстве обычных фотоснимков не присутствуют пейзажи с такими огромными расстояниями, «сейчас», отображенное на фотографии, не является абсолютным ни в каком смысле. Оно уникально для каждого наблюдателя. Понятия «здесь и сейчас» и «там и тогда» для каждого наблюдателя — разные. Только наблюдатели, находящиеся в одном и том же «здесь», могут утверждать, что они находятся в одном и том же «сейчас».

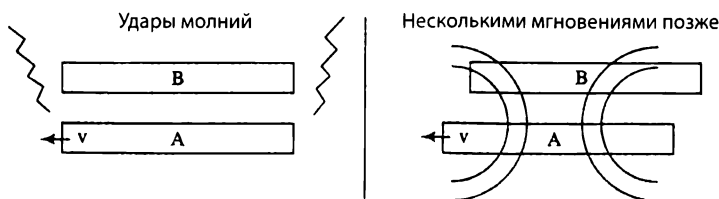
Теория относительности же говорит нам, что наблюдатели, движущиеся друг относительно друга, не могут договориться о том, что такое «сейчас», даже если они находятся одновременно в одном «здесь». Это происходит оттого, что для них понятия «там» и «тогда» различаются. Позвольте мне привести вам один из наиболее часто используемых дидактических примеров, придуманный самим Эйнштейном и представляющий мне наиболее удачным. Рассмотрим двух наблюдателей, едущих на двух поездах, движущихся параллельно друг другу с постоянной относительной скоростью. Неважно, какой поезд на самом деле движется, а какой стоит, потому что нет никакого способа выяснить это. Предположим, что в тот момент, когда эти наблюдатели, сидящие каждый в середине своего поезда,

проезжают друг мимо друга, в головной и хвостовой вагоны поезда *A* одновременно ударяют две молнии. Сначала посмотрим, что видит наблюдатель *A*:



Он видит вспышки от молний одновременно, и поскольку он находится точно посередине поезда, то приходит к выводу, что оба удара молний также произошли одновременно. Однако наблюдатель *B* за то время, пока свет от молний дойдет до него, успеет сместиться вправо, следовательно, он сначала увидит правую вспышку, а затем левую.

На первый взгляд, в этом нет ничего необычного. Наблюдатель *B* видит правую вспышку света раньше из-за того, что он приближается к правой вспышке и удаляется от левой. Однако первый постулат Эйнштейна говорит нам, что скорость света для *B* точно такая же, как и для *A*, и, с его точки зрения, свет от левой вспышки движется к нему с той же скоростью, что и от правой. Таким образом, *B* будет «наблюдать» следующее:



В результате *B* должен прийти к неизбежному выводу, что удар молнии справа произошел раньше удара молнии слева. И это не кажущийся эффект, для него молния справа действительно ударяет раньше, чем молния слева! Пытаясь согласовать свои наблюдения, *A* и *B* не смогут прийти к единому мнению, поскольку в силу принципа относительности каждый из них вправе считать себя покоящимся, а движущимся другого. Из этого следует парадоксальный вывод: удаленные события, которые являются одновременными для одного наблюдателя, не обязательно будут одновременными для другого.

Подобный мысленный эксперимент привел Эйнштейна к выводу, что два краеугольных камня нашей картины мира — абсолютное пространство и абсолютное время — должны быть изъяты из здания физики. Для движущихся относительно друг друга наблюдателей абсолютных пространства и времени не существует: *A* будет наблюдать, что часы *B* идут медленнее, чем часы *A*, но при этом *B* будет наблюдать, что часы *A* идут медленнее, чем часы *B*. Кроме того, *A* будет наблюдать, что поезд *B* короче, чем поезд *A*, а *B* будет наблюдать, что поезд *A* короче, чем поезд *B*.

Если у вас сложилось мнение, что все эти парадоксы связаны исключительно со способом наблюдения, то вы ошибаетесь. Для каждого наблюдателя течение времени и масштаб линейки у другого наблюдателя на самом деле другие. Поскольку в физике именно измерение определяет реальность, и мы не беспокоимся о реальности, которая лежит за рамками наших измерений, то все, что мы измеряем, это и есть то, что происходит на самом деле. Вот один из примеров. Космические лучи, которые постоянно бомбардируют Землю, содержат частицы очень высоких энергий, движущиеся со скоростью, близкой к скорости света. Когда они попадают

в верхние слои атмосферы, то сталкиваются с ядрами атомов газов, из которых состоит воздух, «высекая» из них ливень других элементарных частиц.

Одна из наиболее многочисленных частиц, рождаемых таким образом, называется *мюоном*. Эта частица практически идентична хорошо знакомому нам электрону, за исключением того, что она тяжелее. Даже сегодня у нас нет ни малейшего представления, почему существует более тяжелая копия электрона. Узнав об открытии мюона, известный американский физик Исидор Исаак Раби отреагировал на него саркастическим вопросом: «Ну и кто это заказывал?» Из-за того, что мюон тяжелее электрона, он нестабилен и распадается на электрон и два нейтрино.

Среднее время жизни мюона, измеренное в лаборатории, составляет около одной миллионной доли секунды. Частица, время жизни которой составляет одну миллионную секунды, двигаясь со скоростью света, способна пролететь около 300 метров, прежде чем распасться. Таким образом, мюоны, рождаемые в верхних слоях атмосферы, по идее не должны достигать поверхности Земли. Однако же мюоны доминируют в космических лучах над всеми остальными частицами, кроме фотонов и электронов!

Теория относительности объясняет этот парадокс следующим образом: «собственные часы» мюона идут медленнее часов наблюдателя на поверхности Земли, потому что мюон движется со скоростью, близкой к скорости света. В своей собственной системе отсчета мюон распадается за одну миллионную долю секунды, но в системе отсчета наземного наблюдателя при этом может пройти несколько секунд. Это простое наблюдение подтверждает тот факт, что для движущегося объекта время действительно замедляется.

Я не могу пройти мимо другого (моего любимого) парадокса, показывающего, насколько реальны эти эффекты и насколько относительно наши представления о реальности. Предположим, у вас есть суперавтомобиль, способный разогнаться до субсветовых скоростей. Предположим, что длина вашего автомобиля — 4 метра, и размеры моего гаража тоже составляют 4 метра. Когда автомобиль влетает в мой гараж на сумасшедшей скорости, в моей, гаражной, системе отсчета его длина составит, скажем, только 3 метра из-за релятивистского сокращения расстояний. Таким образом, я теоретически могу успеть закрыть ворота после того, как автомобиль въедет в гараж, и он полностью там поместится. Затем я открою вторые ворота, и автомобиль благополучно покинет гараж, но в течение короткого промежутка времени он будет находиться внутри запертого гаража. Однако, с точки зрения водителя автомобиля, релятивистское сокращение претерпевает не автомобиль, а гараж, и в тот момент, когда автомобиль находится в гараже, гараж оказывается короче автомобиля, и я никак не могу закрыть одновременно передние и задние ворота, не повредив автомобиля.

Самое поразительное, что и я, и он правы. Я, то есть владелец гаража, действительно сначала закрыл передние ворота, а потом открыл задние и несколько мгновений наблюдал автомобиль, несущийся внутри закрытого гаража. Водитель же автомобиля наблюдал совершенно иную картину.

Ничто не является более реальным для человека, чем то, что он видит собственными глазами. Ключевой момент в разрешении этого парадокса состоит в том, что для разных наблюдателей последовательность удаленных от них событий может быть разной. Водитель будет настаивать на том, что, когда бампер автомобиля приблизился ко вторым воротам,

багажник еще выступал из первых и что сначала открылись вторые ворота гаража и только потом закрылись первые. Владелец же гаража будет утверждать, что все происходило с точностью до наоборот: сначала закрылись первые ворота и только потом открылись вторые.

Но если мое «сейчас» отличается от вашего «сейчас», мои секунды отличаются от ваших секунд, мои метры отличаются от ваших метров, то существует ли вообще что-нибудь, относительно величины чего мы могли бы прийти к консенсусу? Ответ на этот вопрос положительный, и лежит он в области новых соотношений между пространством и временем в теории относительности.

Помните, рассуждая об универсальности скорости света, я говорил, что пространство имеет времениподобный характер? Эту идею можно развить дальше. Для одного наблюдателя вспышки молний разделены пространственным интервалом, но одновременны во времени, тогда как для другого эти события разделены не только пространственным, но и временным интервалом. Если же скорость второго наблюдателя будет близка к скорости света, то пространственное расстояние между вспышками сократится для него почти до нуля и останется только временной интервал.

Таким образом, то, что для одного наблюдателя является расстоянием (между вспышками), для другого может оказаться промежутком времени.

Для того чтобы скорость света не зависела от движения наблюдателя, пространство и время должны быть связаны друг с другом особым образом. Поскольку скорость определяется путем деления пройденного расстояния на затраченное время, для того чтобы оба наблюдателя измерили одну и ту же скорость света, их пространственные и временные меры

должны как-то преобразовываться при переходе от одного наблюдателя к другому. Мера, не изменяющаяся при переходе от одного наблюдателя к другому, действительно существует, но она включает не пространство или время по отдельности, а их комбинацию. Такую абсолютную меру нетрудно обнаружить. Расстояние, которое проходит луч света за время t , есть $d = ct$, где c — скорость света. Для любого другого наблюдателя, определяющего скорость света, измеренные им величины d' и t' также должны удовлетворять уравнению $d' = ct'$. Математически это означает, что квадрат некой величины $s^2 = c^2t^2 - d^2 = c'^2t'^2 - d'^2$ должен быть равен нулю для любого наблюдателя. Это соотношение оказалось тем ключом, который открыл перед Эйнштейном новую картину пространства и времени.

Вернемся к аналогии с пещерой. Представьте себе, что в какой-то момент времени на стене пещеры видна тень от линейки:

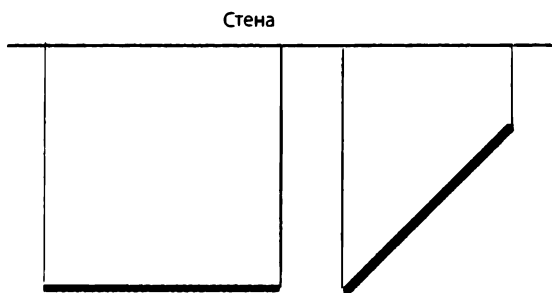


А в другой момент тень от той же линейки выглядит так:

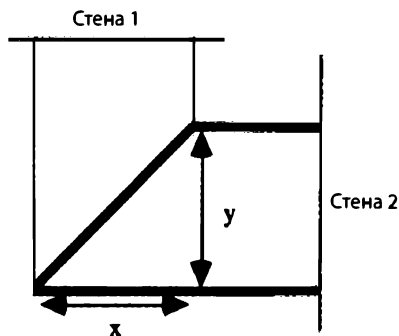


Если наш пещерный житель воспользуется тенью от линейки для измерения расстояния, он обнаружит, что размеры одних и тех же предметов, измеряемые им, постоянно оказываются разными. Мы, не ограниченные двумерной стеной пещеры и живущие в трехмерном мире, могли бы найти решение проблемы, обратив внимание на то, что длина тени

на стене зависит от угла, под которым расположена линейка по отношению к стене и к источнику света.



Затем мы бы заметили, что, когда линейка поворачивается, ее длина не изменяется, но изменяется длина проекции линейки на стену. Например, когда две стены образуют прямой угол, проекции линейки на эти стены будут выглядеть следующим образом:



Если длина линейки — L , то, согласно теореме Пифагора, $L^2 = x^2 + y^2$. Таким образом, даже когда отдельные проекции x и y изменяются, сумма их квадратов всегда остается постоян-

ной. В тот момент, когда для исследователя, наблюдающего только y -проекцию, «измеряемая» им длина линейки становится равной нулю, для исследователя, наблюдающего только x -проекцию, «измеряемая» длина линейки максимальна, и наоборот.

Математически именно так ведут себя пространство и время для двух наблюдателей, движущихся относительно друг друга. Движущийся поезд сокращается относительно неподвижного наблюдателя в пространстве, то есть становится короче, однако «растягивается» во времени в том смысле, что часы в движущемся поезде идут медленнее, чем часы неподвижного наблюдателя.

Еще важнее то, что упомянутая величина s является в теории относительности аналогом длины линейки L из предыдущего примера. Эта мера — s — называется *пространственно-временным интервалом* и определяется как $s^2 = c^2t^2 - d^2$. Она представляет собой комбинацию пространственного и временного интервалов между событиями и всегда равна нулю для двух событий, лежащих на пространственно-временной траектории луча света. То есть если свет, испущенный из точки, в которой происходит первое событие, достигает точки, в которой происходит второе событие в момент этого события, то пространственно-временной интервал между этими событиями равен нулю. Интервал одинаков для всех наблюдателей, независимо от того, как они движутся друг относительно друга. Если два события не лежат на пространственно-временной траектории луча света, то интервал между ними будет отличен от нуля, но он по-прежнему будет одним и тем же для всех наблюдателей.

Таким образом, интервал s является, как говорят, *инвариантом* в теории относительности. Интервал для движущихся

по-разному наблюдателей представляет собой то же, что длина линейки для пещерных обитателей. В теории относительности интервал — это пространственно-временная длина. Три пространственных измерения и время оказываются тесно связанными друг с другом, наподобие того, как тесно связаны две проекции линейки на стенах пещеры. Движение объекта приводит к изменению проекции четырехмерного пространства-времени на трехмерную сцену, которую мы называем словом «сейчас», подобно тому, как поворот линейки приводит к изменению ее двухмерной проекции на стену пещеры! Эйнштейн, руководствуясь постулатом о постоянстве скорости света, получил возможность сделать то, о чем большинство из нас могло бы только мечтать. Он выглянул за стены пещеры и увидел доселе скрытую от него реальность, подобно тому, как наш персонаж однажды обнаружил, что круглая и прямоугольная тени на стене пещеры принадлежат цилиндрическому контейнеру. Но к чести Эйнштейна, он на этом не остановился. Картина еще не была завершена. Его путеводной нитью снова оказался луч света. Все наблюдатели, движущиеся с постоянной скоростью, видят луч света, движущийся относительно них со скоростью c , и ни один из них не может утверждать, что он покоится, в то время как движутся все остальные. Движение относительно. Но что, если скорость движения наблюдателей *не постоянна*? Что, если один из них движется с ускорением? Смогут ли в этом случае все наблюдатели, включая ускоряющегося, однозначно утверждать, что один из них движется с ускорением? Чтобы исследовать этот вопрос, Эйнштейн придумал еще один мысленный эксперимент. Как вы определяете, находясь в лифте, когда и в каком направлении он начинает движение? Когда лифт начинает движение вверх, вы чувствуете, что стали немного тяжелее; когда же лифт начинает двигаться вниз, вы ощущаете, что

стали легче. Но откуда вы знаете, что изменение вашего веса вызвано ускорением лифта, а не изменением силы тяжести?

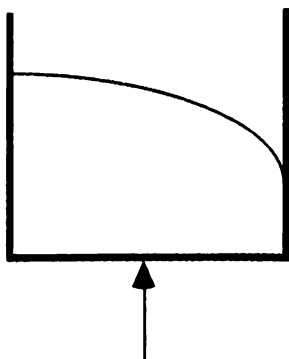
Не спешите с ответом. Не существует ни одного эксперимента, который дал бы запертому в лифте наблюдателю ответ, движется лифт с ускорением или покоится в гравитационном поле. Давайте упростим мысленный эксперимент. Пусть лифт находится в глубоком космосе вдали от тяготеющих тел. Когда он находится в состоянии покоя или движется равномерно и прямолинейно, мы испытываем внутри него полную невесомость. Если лифт начнет ускоряться, скажем, вверх, его пол начнет давить на ноги, чтобы придать вам такое же ускорение, которое испытывает он сам. Если вы выпустите мяч из ваших рук, он начнет «падать» на пол. Почему? Потому что если мяч первоначально находился в состоянии покоя, то он, согласно Галилею, будет стремиться сохранить это состояние, однако пол лифта движется вверх с ускорением и в конце концов настигнет мяч. С вашей точки зрения, это будет выглядеть, как будто мяч с ускорением полетел вниз и ударился об пол. Более того, ускорение мяча не зависит от его массы. Действительно, какой бы мяч вы ни взяли, пол лифта настигнет его через тот же самый промежуток времени.

Если бы Галилей оказался вместе с вами в лифте, он мог бы поклясться, что находится на Земле. Все опыты с падающими телами, которые он поставил за свою жизнь, будут проходить в таком лифте точно так же, как и на поверхности Земли. Таким образом, если Галилей пришел к выводу, что все законы физики выполняются одинаково во всех системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно, то Эйнштейн пошел дальше и понял, что законы физики должны быть одинаковы для системы отсчета, движущейся с постоянным ускорением, и для системы отсчета, покоящейся

в гравитационном поле. С этой точки зрения ускорение тоже относительно, просто один наблюдатель назовет его ускорением, а другой — гравитацией.

Снова Эйнштейн выглянул за пределы пещеры. Если гравитация может быть «создана» внутри лифта, то, может быть, мы все живем внутри метафорического лифта? Может быть, то, что мы называем гравитацией, на самом деле является ускорением, и все зависит только от выбранной точки зрения? Мы живем на Земле. Земля обладает большой массой. Возможно, то, что мы воспринимаем как силу притяжения между двумя массами, является результатом какого-нибудь хитрого искажения окружающего нас пространства-времени?

Чтобы сложить получившийся пазл, Эйнштейн снова обратился к свету. Он показал, что постоянство скорости света должно определять способ, которым пространство и время сшиваются вместе. Что делает луч света в ускоряющемся лифте? Для внешнего наблюдателя свет будет распространяться с постоянной скоростью по прямой линии. Но для наблюдателя, находящегося внутри ускоряющегося лифта, траектория луча света окажется искривленной:



В системе отсчета лифта луч света будет отклоняться вниз, потому что лифт ускоряется вверх. Другими словами, свет будет «падать». Но если ускорение в лифте эквивалентно покою в гравитационном поле, то луч света должен изгибаться, проходя мимо массивных тел. По большому счету, это неудивительно. Эйнштейн к тому времени уже показал, что масса и энергия эквивалентны и взаимозаменяемы. Энергия светового луча увеличивает массу поглощающего его тела. Аналогично масса тела может перейти в излучение и быть унесенной лучом света в виде энергии. Таким образом, если свет может нести энергию, то он может вести себя так, будто он имеет массу, а все массивные объекты попадают в гравитационное поле.

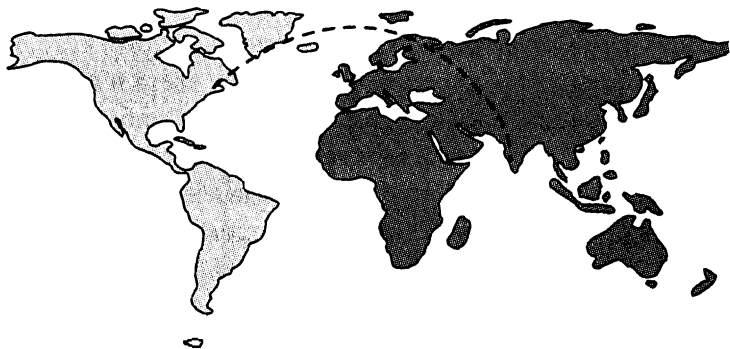
Но с этим понятием имеется одна фундаментальная проблема. Падающий мяч ускоряется. Его скорость зависит от его координат. Однако мы же только что подвели постоянство скорости света под фундамент специальной теории относительности. Свет всегда должен путешествовать с одной и той же скоростью, независимо от того, как движется наблюдатель по отношению к лучу света и по отношению к другим наблюдателям. Поэтому наблюдатель, располагающийся в левой верхней части лифта, должен при измерении скорости света получить значение c . Но наблюдатель в правой нижней части лифта должен получить то же самое значение c , несмотря на то что к моменту, когда свет дошел до него, его скорость успела возрасти по сравнению со скоростью первого наблюдателя.

Как примирить эти результаты с выводом, что луч света в лифте изгибается, потому что он «падает»? Кроме того, поскольку Эйнштейн постулировал, что в гравитационном поле должны иметь место те же явления, что и в ускоряю-

щемся лифте, свет в гравитационном поле тоже должен «падать». Это может произойти, только если скорость света будет разной в разных точках пространства!

Есть только один способ примирить два противоречащих друг другу поведения света: искривление светового луча под действием гравитационного поля или внутри ускоряющегося лифта и постоянство скорости света для любого наблюдателя: масштаб линейек и ход часов различных наблюдателей, даже находящихся в одной системе отсчета — в ускоряющемся лифте или на поверхности Земли, — должны зависеть от их положения в пространстве и времени!

Что в этом случае происходит с пространством и временем? Чтобы понять это, вернемся снова в нашу пещеру. Предположим, что на плоской стене пещеры изображена карта, на которую нанесен путь самолета, следующего из Нью-Йорка в Бомбей:



Можем ли мы добиться того, чтобы кривая траектория на этом рисунке выглядела локально как прямая линия, вдоль которой самолет двигался бы равномерно и прямолинейно? Один из способов — позволить линейкам изменять свою

длину в зависимости от широты места. Как вы, возможно, заметили, Гренландия на этой карте выглядит больше Европы. Если линейка в полярных широтах имеет большую длину, чем в средних, то географ, отправившись с этой линейкой в Гренландию и измерив ее размеры, что называется, «на месте», а затем проделав то же самое в Европе, убедится, что при подобных локальных измерениях Гренландия оказывается гораздо меньше Европы.

Для обитателя пещеры такое предложение может показаться безумным, но не для нас, знающих, что Земля круглая. Предложенное решение эквивалентно предположению, что поверхность, на которой изображена карта, на самом деле неплоская, а приведенное изображение представляет собой проекцию на плоскость стены пещеры карты, нарисованной на сфере. И на реальной земной сферической поверхности расстояния при приближении к полюсам действительно сокращаются по сравнению с изображенными на плоской карте. Если перенести траекторию самолета на глобус, то сразу же станет очевидно, что она представляет собой кратчайший путь из Нью-Йорка в Бомбей, и самолет действительно будет двигаться вдоль нее с постоянной скоростью и не меняя направления.

Какой из этого следует вывод? Если мы хотим быть последовательными, мы должны признать, что для разрешения упомянутого ранее противоречия пространство-время в системе отсчета, движущейся с ускорением или находящейся в гравитационном поле, должно быть искривленным. Почему же мы не ощущаем эту кривизну, если она на самом деле существует? Потому что мы всегда воспринимаем пространство локально в небольшой окрестности. Представьте себе таракана, живущего в Канзасе. Мир для него представляет собой плоскую, как доска, двухмерную

поверхность. Только позволив себе роскошь посмотреть на эту поверхность из трехмерного пространства, можно увидеть, что на самом деле она представляет собой поверхность сферы. Аналогично, чтобы увидеть кривизну трехмерного пространства, надо посмотреть на него из четырехмерного, но это так же невозможно для нас, как невозможно для таракана, обреченного вечно ползать по поверхности земли, — трехмерное пространство находится за пределами его восприятия.

В этом смысле Эйнштейн был Эратосфеном XX века. Эратосфен утверждал, что Земля — шар, и чтобы в этом убедиться, достаточно пронаблюдать за тем, на какую высоту поднимается в полдень солнце в разных городах¹. Эйнштейн утверждал, что трехмерное пространство искривлено, и чтобы в этом убедиться, достаточно пронаблюдать за поведением светового луча в гравитационном поле. Эйнштейн предложил три способа проверки его гипотезы.

Во-первых, при прохождении через искривленное пространство рядом с Солнцем световой луч должен отклоняться на вдвое больший угол, чем если бы он просто падал в плоском пространстве. Во-вторых, если пространство возле Солнца искривлено, то орбита ближайшей к Солнцу планеты Меркурий должна представлять собой не идеальный эллипс, а рисовать в пространстве «розетку», что должно приводить к медленному смещению перигелия — наиболее близкой к Солнцу точки орбиты. И в-третьих, часы на первом этаже небоскреба должны идти медленнее, чем на последнем.

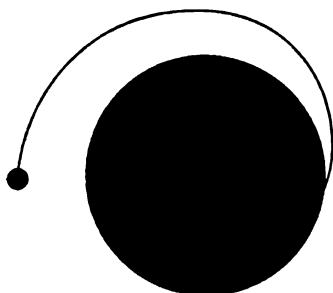
¹ На основании своих наблюдений Эратосфен еще в III веке до н. э. сумел вычислить радиус Земли. Его результат менее чем на 3 % расходится с современным значением. — *Примеч. пер.*

Смещение перигелия Меркурия было известно уже давно, и расчет Эйнштейна прекрасно совпал с наблюдаемой величиной. Однако объяснение чего-то уже известного не так впечатляет, как предсказание чего-то нового. Два других предсказания Эйнштейна относились как раз к последней категории.

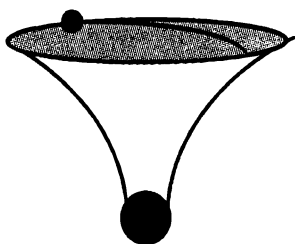
В 1919 году экспедиция под руководством сэра Артура Стэнли Эддингтона отправилась в Южную Африку для наблюдения полного солнечного затмения. Когда луна закрыла солнечный диск, Эддингтон сфотографировал звезды, расположенные вблизи Солнца. Сравнив полученную фотографию с фотографией, выполненной в другое время года, он определил, что видимые положения звезд во время затмения отличаются от обычных в точности на предсказанную Эйнштейном величину. Луч света действительно изгибался, проходя мимо Солнца, а имя Эйнштейна с тех пор стало нарицательным.

Третья проверка была выполнена лишь сорок лет спустя. Сотрудник Гарвардского университета Роберт Паунд и его аспирант Глен Ребка показали, что частота света, излученного в подвале физической лаборатории, уменьшается, когда свет достигает приемника, расположенного на верхнем этаже. И это изменение частоты точно совпало с предсказанным Эйнштейном.

С точки зрения общей теории относительности искривление траектории и ускорение движущегося в гравитационном поле тела могут быть представлены как проявление кривизны пространства. Чтобы это понять, вернемся снова к двухмерной аналогии. Представим себе, что мы видим на стене пещеры следующую проекцию траектории движения тела вокруг большого объекта.



Для объяснения такого движения можно придумать силу, которая действует на небольшое тело со стороны большого. Но можно предположить, что настоящая поверхность, по которой движется тело, искривлена в трехмерном пространстве, и тело движется со своей точки зрения «прямо», но его траектория проходит по искривленной поверхности:



Похожие аргументы использовал и Эйнштейн, утверждая, что вместо силы притяжения, действующей между двумя телами, можно рассматривать ситуацию, когда массивное тело искривляет пространство-время вокруг себя, а другие тела, стремясь двигаться «прямо» в искривленном пространстве—времени, движутся по искривленным траекториям. Это замечательное соотношение между материей и пространством-

временем напоминает Уробороса — змея, который кусает себя за хвост. Кривизна пространства управляет движением материи, распределение материи в пространстве, в свою очередь, управляет кривизной пространства. Именно эта обратная связь между материей и кривизной делает общую теорию относительности намного сложнее ньютоновской механики, где пространство, в котором перемещаются объекты, абсолютно и неизменно.

В привычном окружающем нас мире кривизна пространства настолько мала, что ее последствия практически незаметны, и это является одной из причин, по которой понятие искривленного пространства кажется нам чуждым. Путешествуя из Нью-Йорка в Лос-Анджелес, луч света отклоняется из-за искривления пространства, вызываемого массой Земли, всего на один миллиметр. Однако если время путешествия света велико, то даже небольшой эффект может привести к заметным последствиям. Возьмем, к примеру, сверхновую 1987 года, о которой я уже упоминал как об одном из самых интересных астрономических событий XX века. Нетрудно посчитать — и мы с моим коллегой действительно подсчитали и поразились настолько, что написали об этом научную статью, — что небольшой кривизны пространства, сквозь которое свет от сверхновой 1987 года добирается до нас с другого конца Галактики, оказалось достаточно, чтобы задержать его прибытие на девять месяцев! Если бы пространство не было искривлено, мы увидели бы вспышку сверхновой 1987 года еще летом 1986-го.

Финальным испытательным полигоном для идей Эйнштейна стала сама Вселенная. Общая теория относительности описывает не только искривление пространства вблизи массивных тел, но и геометрию всей Вселенной. Если средняя плотность вещества во Вселенной окажется достаточно

большой, то пространство может искривиться настолько, что замкнется в гигантский аналог сферы в трехмерном пространстве. Но что еще более важно, в этом случае Вселенной придется рано или поздно остановить свое расширение и начать сжиматься, придя в конечном итоге к Большому сжатию — явлению, обратному Большому взрыву.

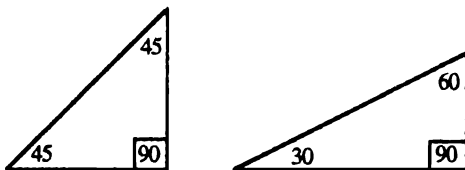
Есть что-то зачаровывающее в «закрытой» Вселенной — как называют Вселенную с высокой средней плотностью вещества. Я помню, как, будучи еще студентом, впервые услышал об этом на лекции астрофизика Томаса Голда и запомнил на всю жизнь. В закрытой Вселенной, которая замкнута сама на себя, луч света, движущийся по прямой линии, в конечном итоге вернется в ту точку, из которой он вышел, подобно тому как вернется в исходную точку путешественник, совершивший кругосветное путешествие на поверхности Земли. То есть свет в такой Вселенной никогда не сможет уйти в бесконечность. Когда подобное происходит в меньших масштабах, то есть когда космический объект имеет настолько высокую плотность, что даже свет не может убежать с его поверхности, мы называем его *черной дырой*.

Если наша Вселенная закрыта, то мы сами живем внутри самой настоящей черной дыры! Но не в той, которая показана в диснеевском фильме 1979 года. Суть в том, что чем больше размер черной дыры, тем меньше должна быть плотность вещества, необходимая для ее создания. Черная дыра с массой Солнца будет иметь размер порядка километра и среднюю плотность в сотни миллиардов тонн на кубический сантиметр. Черная дыра с массой, равной массе наблюдаемой части Вселенной, будет иметь размер, сравнимый с размером видимой части Вселенной, при средней плотности всего лишь порядка 10^{-29} грамма на кубический сантиметр!

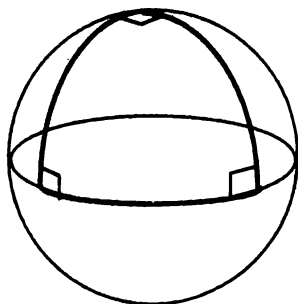
Сегодняшние наблюдательные данные, однако, свидетельствуют о том, что мы живем не внутри черной дыры. По крайней мере, большинство теоретиков считает, что средняя плотность вещества во Вселенной хотя и близка к *критической*, но все же недостаточна, чтобы закрыть Вселенную. По данным наблюдений, наш мир, скорее всего, избежит Большого сжатия и будет продолжать расширяться вечно. Характер расширения Вселенной более всего соответствует пограничному случаю между *открытой* и *закрытой* Вселенными, который носит название *плоской* Вселенной, и если источником гравитационного притяжения служит материя, то расширение Вселенной будет в этом случае происходить замедляющимися темпами, но никогда не остановится. Так как для плоской Вселенной необходима средняя плотность вещества примерно в 100 раз больше наблюдаемой, теоретики пришли к выводу, что на 99 % Вселенная состоит из *темной материи*, невидимой для телескопов, о чем я уже рассказывал в главе 3. Причем даже рассчитанного путем «взвешивания» галактик и скоплений галактик количества темного вещества все равно оказывается в три раза меньше, чем необходимо для плоской Вселенной.

Как мы можем доказать правильность этого предположения? Например, можно попытаться определить среднюю плотность в галактиках и скоплениях галактик, как описывалось в главе 3, но это косвенный способ, который не дает прямых свидетельств плоскости Вселенной. Однако существует способ, позволяющий — по крайней мере, в принципе — напрямую измерить кривизну пространства. Каким образом разумный таракан из Канзаса мог бы удостовериться в кривизне земной поверхности, не совершая кругосветного путешествия и не поднимаясь в космос? Даже не будучи в состоянии представить себе сферу в трехмерном пространстве, подобно тому как мы не можем представить

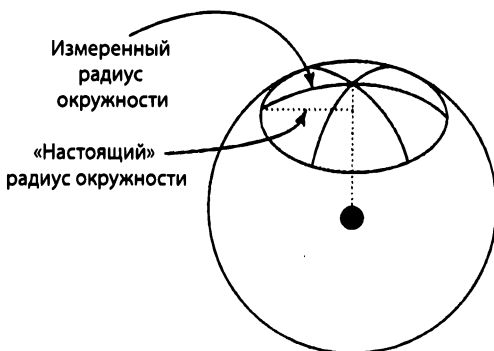
себе трехмерную гиперсферу в четырехмерном пространстве, он мог бы провести ряд измерений, которые убедили бы его в том, что поверхность Земли является сферой. Еще Евклид более двадцати веков назад доказал, что сумма трех углов в любом треугольнике, начерченном на бумаге, равна 180° . Если я нарисую прямоугольный треугольник, один из углов которого имеет величину 90° , сумма двух других углов также должна составлять 90° . Поэтому каждый из оставшихся углов должен быть меньше 90° , как показано на следующем рисунке:



Но это справедливо только на плоскости. На поверхности сферы я могу нарисовать треугольник, все углы которого будут иметь величину 90° . Для этого достаточно провести одну линию по экватору от нулевого до девяностого меридиана, а от ее концов провести две линии, пересекающиеся на Северном полюсе:



Если вы помните, окружность радиуса r имеет длину $2\pi r$. Однако на сфере длина любой параллели всегда меньше, чем умноженное на 2π расстояние от полюса до этой параллели, отмеренное по поверхности сферы. Данная ситуация показана на следующем рисунке:



Нарисовав на поверхности Земли большой треугольник или большую окружность, мы по отклонению от предсказаний Евклида можем вычислить кривизну земной поверхности и определить, что она является сферой. Однако, как видно из рисунка, для того чтобы получить существенное отклонение от геометрии Евклида, нужно нарисовать очень большие геометрические фигуры, сравнимые с размерами Земли.

Для того чтобы произвести аналогичные измерения во Вселенной, нам нужно выполнить геометрические построения, размеры которых сравнимы с размерами самой Вселенной. Вместо окружности мы можем взять сферу в трехмерном пространстве и попытаться определить, как изменяются площадь ее поверхности и объем ограничиваемого ею шара с увеличением радиуса. Если измерения

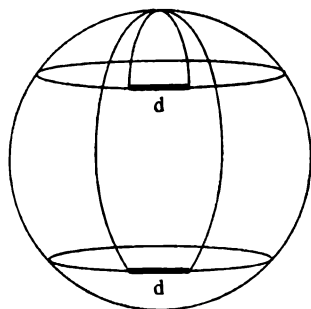
разойдутся с предсказаниями Евклида, значит, пространство нашей Вселенной искривлено.

Но как измерить объем сферы, размер которой составляет существенную часть видимой Вселенной? Ну, например, подсчитав число галактик, находящихся внутри этой сферы, предположив, что Вселенная однородна и плотность галактик в каждый момент времени одинакова в любой части Вселенной. В этом случае мы могли бы считать, что объем сферы пропорционален количеству находящихся внутри нее галактик, и все, что нам останется, это построить график зависимости числа наблюдаемых галактик от расстояния до них. Если пространство искривлено, мы должны увидеть отклонение этого графика от предсказываемого евклидовой геометрией. В 1986 году два молодых принстонских астронома Е. Лох и Е. Спиллар произвели такой подсчет, и полученный ими результат якобы свидетельствовал в пользу того, что Вселенная является плоской. К сожалению, вскоре после публикации их работы было показано, что галактики, эволюционируя, могут сливаться друг с другом, и на основании подсчета их количества нельзя сказать о характере геометрии нашей Вселенной ничего определенного.

Еще одним способом проверить геометрию Вселенной является измерение зависимости угла, под которым виден объект известного размера, от расстояния до этого объекта. На плоскости угол, под которым виден объект, будет уменьшаться с ростом расстояния:



Однако на сфере картина будет совсем иной:



В начале 1990-х годов было предпринято исследование зависимости угла, под которым видны очень компактные объекты в центрах галактик, от расстояния до них. Измерения производились при помощи радиотелескопов, и в обзор попали галактики, находящиеся от нас на расстояниях вплоть до половины радиуса наблюдаемой Вселенной. Полученная зависимость снова свидетельствовала в пользу того, что пространство нашей Вселенной плоское. Однако мы с коллегой показали, что и этот тест содержит неопределенность, связанную с возможной эволюцией исследуемых объектов.

В 1998 году неожиданно появилась совершенно новая возможность определения геометрии Вселенной на основе измерений неоднородности фона космического микроволнового излучения, называемого также *реликтовым излучением*, являющегося отголоском Большого взрыва.

Реликтовое излучение, впервые открытое в 1965 году, приходит к нам со всех сторон. Оно возникло почти 14 миллиардов лет назад и последний раз эффективно взаимодействовало с веществом, когда Вселенной было всего лишь

100 000 лет от роду. В ту давнюю эпоху это излучение имело температуру примерно 3000 градусов по абсолютной шкале Кельвина. В результате сегодня это излучение дает нам картину распределения материи и излучения в ранней Вселенной. Так как излучение, которое мы видим сегодня, приходит равномерно со всех сторон, оно «рисует» для нас сферическую поверхность, существовавшую почти 14 миллиардов лет назад, когда это излучение в последний раз провзаимодействовало с веществом.

Эта сферическая поверхность предоставляет нам идеальную возможность использовать уже описанный ранее геометрический метод, если найти какой-нибудь эталон длины на этой сфере, угловой размер которого мы могли бы затем измерить. К счастью, природа предоставила именно такой эталон. Поскольку сила гравитации — это всегда сила притяжения, то любой фрагмент вещества всегда стремится сжаться под действием собственной гравитации, если только его не удерживает от этого какая-то дополнительная сила. Прежде чем Вселенная остыла до температуры ниже 3000 кельвинов, вещество состояло главным образом из сильно ионизированного водорода, который интенсивно взаимодействовал с излучением, оказывающим давление на вещество. Это давление предотвращало сжатие любого фрагмента вещества, если размеры этого фрагмента не превосходили некоторое критическое значение.

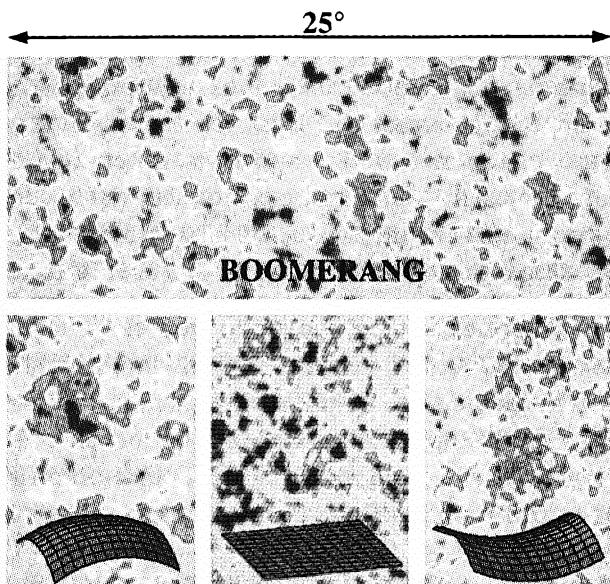
Вы спросите, что это за критическое значение? Сейчас объясню. Когда Вселенной было всего 100 000 лет, свет мог путешествовать по ней на расстояние не более 100 000 световых лет. Поскольку ничто не может распространяться быстрее света, то и гравитационное взаимодействие могло осуществляться только между телами, расстояние между которыми не превышало 100 000 световых лет. Это значит,

что в это время максимальный размер неоднородностей вещества не мог превышать 100 000 световых лет. Когда же Вселенная остыла до 3000 кельвинов, водород рекомбинировал и перестал взаимодействовать с излучением. Давление излучения упало практически до нуля, и первоначальные неоднородности начали сжиматься под действием собственной гравитации. И первоначальный размер этих неоднородностей оказался как раз порядка 100 000 световых лет.

Измерив угловые размеры неоднородностей фона реликтового излучения, астрофизики в 1998 году пришли к выводу, что наша Вселенная все же плоская. Самое интересное, что наблюдаемое распределение неоднородностей с высокой точностью совпало с предсказанием теоретической модели, построенной в предположении, что Вселенная плоская (см. с. 192).

В то же время прямой подсчет общей массы светлой и темной материи, содержащейся в галактиках и скоплениях галактик, окончательно показал, что она дает только 30 % плотности энергии, необходимой для того, чтобы геометрия Вселенной была плоской. Загадочные оставшиеся 70 %, необходимые для обеспечения ускоренного расширения Вселенной, о котором я упоминал в предыдущей главе, получили название *темной энергии*. В итоге получается, что мы живем в очень странном мире, где 99 % общей энергии скрыты от нашего взгляда в форме 30 % темной материи и почти 70 % темной энергии, заполняющей все пустое пространство!

Удивительно, насколько расширилось наше представление о пространстве и времени, с тех пор как Эйнштейн впервые обнаружил между ними скрытую связь. Сегодня мы понимаем, что наша Вселенная представляет собой четырехмерный мир, в котором каждый наблюдатель, прежде чем рас-



На верхнем рисунке представлена наблюдаемая картина распределения интенсивности фона реликтового излучения в небольшой области неба, полученное детектором микроволнового излучения «Бумеранг», расположенным в Антарктиде. На нижних рисунках — три компьютерных модели распределения фона реликтового излучения для закрытой (слева), открытой (справа) и плоской (посередине) Вселенной

смотреть по отдельности пространство и время, должен определить свое собственное «сейчас». Мы также понимаем, что пространство и время неразрывно связаны с материей и энергией и что искривление пространства-времени вблизи массивных объектов приводит к тому, что мы воспринимаем как гравитацию. Мы сумели измерить кривизну пространства-времени нашей Вселенной и пролить свет на ее устройство и дальнейшую эволюцию. Возможно, мы и живем в метафорической пещере, но тени на ее стенах дали нам безошибочные доказательства того, что существу-

ют новые, скрытые ранее связи, которые делают нашу Вселенную более понятной и в конечном итоге более предсказуемой. Прежде чем я обнажу перед вами следующий пласт устройства нашего мира, мне хотелось бы в заключение этой главы вернуться в мир повседневных явлений. Я обещал привести примеры, которые можно найти рядом с домом, а вместо этого, начав с таких простых вещей, как пространство и время, устремился в глубины Вселенной. Но скрытые связи, упрощающие картину Вселенной, лежат не только в глубинах микромира и на необъятных просторах мегамира.

Даже сегодня, когда совершаются грандиозные открытия в отношении пространства, времени и материи, которые я описал в этой главе, обнаруживаются новые связи в таких «экзотических» вещах, как овсянка, и таких разных, как вода и железо. Несмотря на то что предметом открытий, о которых я сейчас расскажу, является повседневная физика, их результаты служат недостающими кусочками пазла для построения «окончательной» теории.

Окружающие нас вещества являются на самом деле очень сложными. Так и должно быть, если подумать, как сильно различаются их свойства. Одна из причин, по которой химическая промышленность и материаловедение привлекают к себе колоссальные финансовые и интеллектуальные инвестиции, состоит в том, что они позволяют получать вещества, пригодные для удовлетворения практически любых потребностей. Иногда новые материалы открываются случайно. Например, высокотемпературная сверхпроводимость была открыта двумя исследователями в лаборатории IBM, которые, как алхимики, наугад тестировали различные вещества без какой бы то ни было теоретической базы. Хотя чаще материалы разрабатываются на основе обобщенных эмпириче-

ских знаний и теоретических предположений. Например, неудовлетворенность некоторыми свойствами кремния — основного материала, из которого изготавливаются полупроводниковые устройства, обеспечивающие работу наших компьютеров и фактически уже управляющие нашей жизнью, заставила ученых искать новые вещества с полупроводниковыми свойствами. Одним из таких материалов оказался галлий, играющий ключевую роль в следующем поколении полупроводников.

Даже простейшие и наиболее распространенные вещества могут проявлять в определенных условиях экзотические свойства. Я никогда не забуду, как мой школьный учитель физики в шутку говорил, что в физике есть две вещи, доказывающие существование Бога.

Во-первых, это вода, которая практически единственная из всех веществ, замерзая, расширяется. Если бы вода не обладала такой особенностью, то водоемы зимой промерзли бы до дна, рыбы не могли бы переживать зиму и, вероятно, никогда не доэволюционировали бы до людей. Во-вторых, коэффициент расширения бетона практически такой же, как коэффициент расширения стали. Если бы это было не так, то современные небоскребы не пережили бы зимы, потому что стальная арматура разорвала бы бетонные конструкции. Должен признаться, что второй пример мне не кажется удачным, потому что, если бы у стали и бетона были разные коэффициенты расширения, мы бы попросту не стали их использовать в строительстве, а нашли бы другие, более подходящие материалы.

В первом примере интересен тот факт, что вода — одно из самых распространенных веществ на Земле — ведет себя при замерзании иначе, чем большинство других веществ.

Если же отвлечься от того, что вода расширяется при замерзании, то во всех остальных отношениях она является прекрасным примером поведения различных веществ при изменении физических условий. При встречающихся на Земле температурах вода может переходить из жидкого состояния в твердое или в газообразное. Каждое такое изменение называется *фазовым переходом*, потому что при этом происходит изменение фазы вещества: из твердой фазы в жидкую, из жидкой в газообразную и обратно. Будет справедливым утверждение, что если мы понимаем механизм и условия, управляющие фазовыми переходами любого вещества, то мы понимаем существенную часть окружающих нас физических явлений.

Главная трудность состоит в том, что в области фазового перехода вещество ведет себя наиболее сложным образом. Когда вода закипает, в ней образуются турбулентные вихри, зарождаются пузырьки пара, которые растут и взрывообразно лопаются на поверхности. Однако в этой хаотической сложности поведения часто содержатся семена порядка. В то время как внутреннее строение коня может показаться безнадежно сложным, простое масштабирование позволяет нам выделить некоторые его свойства, не требующие для своего объяснения углубления во все детали. Аналогично, безнадежно пытаться описать поведение каждого пузырька пара в кастрюле с кипящей водой, но мы можем выделить несколько универсальных процессов, всегда происходящих, когда, скажем, вода кипит при определенной температуре и давлении, и изучить их путем масштабирования.

Например, когда вода кипит при нормальном атмосферном давлении, мы можем выбрать наугад небольшой объем внутри кастрюли и спросить себя: будет ли этот объем содержать

пар или жидкую воду? В небольших масштабах описание окажется очень сложным. Очевидно, что не имеет смысла спрашивать про отдельную молекулу, представляет она собой жидкость или газ, потому что жидкое или газообразное состояние — это свойство множества молекул, характеризующееся, например, тем, близко или далеко они в среднем находятся друг от друга. Очевидно, что для нескольких молекул этот вопрос также не имеет смысла, потому что в процессе движения и столкновений молекулы могут находиться и в жидкости, и в газе, как далеко, так и близко друг от друга. Но как только рассматриваемый нами объем начинает содержать достаточно много молекул, чтобы можно было говорить об их усредненном поведении, вопрос об агрегатном состоянии воды приобретает смысл.

Когда вода кипит при нормальных условиях, пузыри водяного пара и жидкость сосуществуют совместно. Обычно говорят, что при температуре 100 °С на уровне моря вода претерпевает *фазовый переход первого рода*. Любой макроскопический объем воды при температуре, точно соответствующей точке кипения, по прошествии некоторого времени приходит либо в газообразную, либо в жидкую фазу. Оба варианта являются равновероятными. При температуре чуть ниже точки кипения вода в любом пробном объеме всегда будет обнаруживаться в жидком состоянии, при температуре чуть выше точки кипения — в газообразном.

Несмотря на огромную сложность локальных процессов, идущих в воде в точке кипения, когда вода постоянно переходит из жидкого состояния в газообразное и обратно, всегда существует некий пограничный объем, относительно которого вопрос об агрегатном состоянии воды в нем имеет смысл. Для меньших объемов локальные неоднородности плотности делают вопрос об агрегатном состоянии бес-

смысленным. Для больших объемов можно однозначно сказать, в каком состоянии находится в них вода.

Разве не удивительно, что такая сложная система проявляет черты такого единообразного поведения? Это является следствием того факта, что каждая капля воды содержит невероятно огромное количество молекул, и хотя небольшие группы молекул могут вести себя хаотично, в большом объеме их совокупность приобретает конкретные макроскопические свойства. Это чем-то напоминает поведение людей. Каждый отдельный человек имеет свои собственные причины голосовать за того или иного политического кандидата. Некоторые даже пытаются пройти на избирательные участки со своими собственными бюллетенями, в которых вписано имя кандидата, не представленного в общем списке. Но на основе опросов общественного мнения политтехнологи могут с высокой степенью достоверности предсказать, кто из кандидатов победит на выборах. При усреднении по большому количеству избирателей все их индивидуальные различия нивелируются.

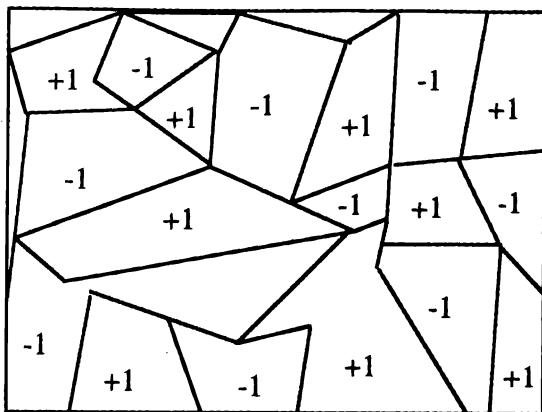
Теперь, когда мы обнаружили скрытый порядок в первоначальном хаосе, попробуем извлечь из него полезную информацию. Например, зададимся вопросом, изменяется ли масштаб, на котором становятся значимыми различия между жидким и газообразным состоянием, при изменении температуры и давления, при которых кипит вода. Если увеличить давление и таким образом увеличить плотность водяного пара, уменьшив тем самым разницу между плотностью пара и плотностью воды, то температура, при которой кипит вода, тоже увеличится. Из-за того, что теперь в точке кипения разность плотностей воды и пара меньше, размер областей, внутри которых агрегатное состояние воды будет неопределенным, как нетрудно догадаться, увеличится.

Если мы будем продолжать увеличивать давление, то придем к тому, что при определенных значениях давления и температуры, называемых *критическими*, различие между жидкостью и газом пропадет в любом, даже бесконечном объеме. Вещество в таком состоянии невозможно отнести ни к жидкости, ни к газу. Немного ниже этой температуры и плотности вода больше похожа на жидкость, немного выше — на газ. Но станете ли вы считать воду при критической температуре жидкостью, газом или и тем и другим одновременно, зависит только от вашей точки зрения.

В критической точке у воды появляются новые, отсутствующие у жидкой воды и у водяного пара, свойства. Во-первых, на всех масштабах вещество выглядит одинаково. Вода в критической точке является «самоподобной» относительно изменения масштаба, в котором вы ее изучаете. Если изобразить происходящие в воде флуктуации в большом увеличении, вы не заметите никаких отличий от картины этих флуктуаций при обычном масштабе. Во-вторых, в критической точке в воде возникает явление, называемое *критической опалесценцией*. Из-за того, что в воде присутствуют флуктуации любого размера, она начинает рассеивать свет, имеющий любую длину волны, что проявляется в том, что вода теряет прозрачность и становится больше похожей на облако.

У этого состояния воды есть еще одна интересная особенность. Свойство, когда что-то выглядит одинаково на разных масштабах, носит название *масштабная инвариантность*. Из-за масштабной инвариантности характер микроскопической структуры воды — то есть тот факт, что молекулы воды состоят из двух атомов водорода и одного атома кислорода, — становится неактуальным. Единственный параметр, который характеризует систему в критической точ-

ке, — это плотность. Если мы пометим области, в которых плотность чуть выше, как «+1», а области, в которых плотность чуть ниже, как «-1», то на всех масштабах структура воды будет выглядеть, как показано на следующем рисунке:



Это больше чем просто упрощенная картинка. Тот факт, что вода на всех масштабах физически представлена только этой одной эффективной степенью свободы, характеристикой, которая может принимать только два значения, полностью определяет характер фазового перехода в области критической точки. Это означает, что фазовый переход жидкость — газ для воды абсолютно идентичен фазовому переходу любого другого вещества, которое в своей критической точке может быть описано как набор чисел +1 и -1.

Рассмотрим, например, железо. Мало кто способен спутать кусок железа со стаканом воды, но каждый, кто когда-либо играл с магнитами, знает, что кусок железа можно намагнитить. На микроскопическом уровне каждый атом железа

является маленьким магнитом, имеющим северный и южный полюсы. Когда поблизости нет других магнитов, атомы железа ориентированы случайным образом, так что в среднем их индивидуальные магнитные поля компенсируют друг друга, и суммарное магнитное поле равно нулю. Однако под влиянием внешнего магнита все атомные «магнитики» железа выстраиваются в направлении магнитного поля. Если внешнее магнитное поле направлено вверх, то все атомные «магнитики» в железе также повернутся вверх. Если внешнее магнитное поле направлено вниз, то все атомные «магнитики» в железе повернутся вниз.

Теперь представим себе идеализированный кусок железа, в котором атомные «магнитики» могут быть ориентированы только вверх или вниз, но ни в каком ином направлении. При низкой температуре при наличии внешнего магнитного поля, направленного, например, вверх, все «магнитики» повернутся в этом же направлении. Но если внешнее поле уменьшится до нуля, оно больше не будет диктовать «магнитикам», в каком направлении выстраиваться. Оказывается, «магнитикам» энергетически выгодно быть повернутыми в одном направлении, но в каком — совершенно безразлично. Они могли бы все повернуться вверх или вниз. Это означает, что в таком железном магните может происходить фазовый переход. После того как внешнее магнитное поле исчезнет, атомные «магнитики» могут через некоторое время из-за случайных тепловых колебаний все одновременно спонтанно перевернуться.

Математически это напоминает то же, что происходит с водой. Достаточно лишь заменить направление, в котором ориентированы «магнитики» железа, на знак вариации плотности воды. Как и в случае воды, можно считать, что в отсутствие внешнего магнитного поля для куска железа

существует некий характерный масштаб, такой, что на меньших масштабах тепловые флуктуации могут изменять групповую ориентацию «магнитиков», а на больших — нет, и эта область будет обладать какой-то усредненной намагниченностью в определенном направлении. Кроме того, когда температура повысится до некоторого определенного значения, образец достигнет своей критической точки. В этой точке флуктуации направлений ориентации «магнитиков» будут присутствовать на всех масштабах, и говорить о каком-то выделенном направлении его намагниченности будет бессмысленно.

Самое важное, что в критической точке вода и железо ведут себя одинаково. Тот факт, что в реальности микроскопические структуры этих двух веществ совершенно различны, не имеет значения, потому что свойства вещества в критической точке характеризуются лишь двумя степенями свободы — направлениями вверх и вниз или избыточной и недостаточной плотностью — на всех масштабах физика явления оказывается нечувствительной к микроскопическим различиям. Поведение воды при приближении к критической точке в отношении того, считать ее жидкостью или газом, полностью идентично поведению магнита в отношении направления, в котором он намагничен.

Установление того факта, что мы можем использовать масштабно-инвариантные свойства различных систем вблизи критической точки для нахождения единообразия и порядка в том, что в противном случае представлялось бы невероятно сложным хаосом, является одним из величайших успехов науки, называемой *физикой конденсированных сред*. Этот подход, который произвел революцию в нашем понимании этого раздела физики, был впервые применен в 1960–1970-х годах, Майклом Фишером и Кеннетом Вильсоном

в Корнелле и Лео Кадановым в университете Чикаго. С тех пор всякий раз, когда у физиков возникали сложности, связанные с масштабированием задачи, они использовали методы, разработанные в этом исследовании. В 1982 году Кеннет Вильсон был удостоен Нобелевской премии за свои исследования относительно применимости этих идей для описания свойств не только воды, но и элементарных частиц, о чем я расскажу в заключительной главе. Главное, что это не субмикроскопический мир элементарных частиц и не необъятный космический простор, содержащий скрытые соотношения, упрощающие реальность, это то, что связывает воедино разнообразные и сложные явления материального мира, с которыми мы постоянно сталкиваемся в обычной жизни. Вспоминайте об этом каждый раз, когда услышите шум закипающего чайника или увидите морозные узоры на оконном стекле.



ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ
.....
ПРИНЦИПЫ

Глава 5

В ПОИСКАХ СИММЕТРИИ

— Есть еще какие-то моменты, на которые вы посоветовали бы мне обратить внимание?

— На странное поведение собаки в ночь преступления.

— Собаки? Но она никак себя не вела!

— Это-то и странно, — сказал Холмс.

Артур Конан Дойл

Когда художник думает о симметрии, он думает о бесконечных *возможностях*, снежинках, алмазах или отражениях в пруду. Когда физик думает о симметрии, он думает о бесконечных *невозможностях*. Физику движут не открытия того, что происходит, а открытия того, что не происходит. Вселенная огромна, и опыт учит нас, что все, что может случиться, случается. Порядок же во Вселенной определяется тем фактом, что мы с полной уверенностью можем утверждать, что некоторые события никогда не произойдут. Две звезды в одной галактике могут столкнуться лишь один раз за мил-

лион лет. Но если мы будем наблюдать миллиарды галактик, то зафиксируем несколько тысяч столкновений звезд в год в видимой части Вселенной. С другой стороны, можно прождать десять миллиардов лет, но так никогда и не увидать, как мяч на Земле падает вверх. Это и есть порядок. Симметрия является наиболее важным концептуальным инструментом современной физики именно потому, что она позволяет определить, какие из событий никогда не могут произойти.

Симметрии в природе служат для физиков перилами на горной тропинке: во-первых, они ограничивают круг возможных явлений, а во-вторых, указывают правильный путь для их описания. Что мы имеем в виду, когда говорим, что что-то обладает такой-то симметрией? Возьмем, например, снежинку. Она обладает, говоря математическим языком, гексагональной симметрией. Это означает, что снежинку можно повернуть в шесть различных положений, в которых повернутая снежинка будет неотличима от не повернутой. *Ничего не меняется.*

Теперь рассмотрим более экстремальный, но уже знакомый нам пример: сферического коня. Почему сферического? Потому что сфера — это самая симметричная вещь из всех, которые можно себе вообразить. Сферу можно поворачивать как угодно: относительно любой оси, на любой угол, ее можно даже отразить в зеркале, но она будет выглядеть точно так же, как и до вращения или отражения. *Ничего не меняется!* Но что это нам дает? Поскольку никакой поворот или отражение никак не отражается на сфере, для ее описания нам оказывается достаточно одной переменной — ее радиуса. Таким образом, для изучения любых изменений, которые могут происходить со сферой, нам необходимо менять всего лишь один параметр. Обобщая вышесказан-

ное: чем большим количеством симметрий обладает объект, тем меньше параметров необходимо для его полного описания.

Сложно переоценить важность этого свойства симметрии, и я подробнее расскажу о нем позже. Сейчас же обсудим вопрос, как из наличия симметрии следует запрет чего-либо. Одно из наиболее важных свойств нашего мира, на которое обратил внимание недоумевающего Ватсона Шерлок Холмс, заключается в том, что некоторые вещи в нем никогда не происходят. Мяч никогда не начинает сам по себе скакать по лестнице на второй этаж или катиться вверх по пандусу. Наполненный водой чайник никогда не закипит сам по себе, маятник никогда не поднимется выше, чем он поднимался на предыдущем периоде колебаний. Все эти запреты являются следствиями наличия в природе определенных симметрий.

Понимание этого факта выкристаллизовалось в конце XVIII — начале XIX века из классических работ по математической физике француза Жозефа Луи Лагранжа и англичанина Уильяма Роуэна Гамильтона, создавших обобщенное математическое описание ньютоновской механики. Плодами их трудов воспользовалась в начале XX века немецкая женщина — талантливый математик Эмми Нётер. К сожалению, ее острый интеллект не облегчил ей жизнь в человеческом обществе — после прихода в 1933 году к власти нацистов она была изгнана с математического факультета Гёттингенского университета, несмотря на заступничество величайшего математика того времени Давида Гильберта. Он безуспешно пытался убедить университетское начальство, что наука не знает национальностей и рас, но руководители университета предпочли проявить лояльность к новой власти.

В теореме, носящей имя Нётер, содержится математический результат, имеющий глубокое фундаментальное значение для всей физики. Переформулированная на языке физики, теорема Нётер гласит следующее: если уравнения, описывающие динамическое поведение физической системы, не изменяются при каких-то преобразованиях этой системы, то для каждого такого преобразования должна существовать физическая величина, которая в этой системе сохраняется с течением времени.

Эта теорема сильно упрощает объяснение некоторых вещей, понятное изложение которых наталкивается на большие трудности у популяризаторов науки и даже у отдельных авторов учебников, поскольку она позволяет легко и просто доказать, почему какие-то явления невозможны.

Рассмотрим, например, вечный двигатель, так часто изобретаемый сумасшедшими учеными. Как я уже рассказывал в главе 1, такие машины могут иметь чрезвычайно сложное устройство, что позволяет запудривать мозги легковерным инвесторам.

Стандартным объяснением, почему подобные машины не могут работать, является отсылка к закону сохранения энергии. Большинство людей имеют достаточно четкое интуитивное представление об энергии, поэтому мы можем легко объяснить им причину невозможности такой машины.

Вспомните рисунок машины, который я приводил в первой главе. Как я тогда объяснял, после совершения полного цикла все детали машины должны встать на те же самые места и вернуться в те же самые положения, в которых они были в начале. Если машина в начале цикла была неподвижна, она должна быть неподвижной и в конце, в противном случае энергия машины в конце цикла будет больше ее энергии

в начале. Энергия не берется из ниоткуда, и если общая энергия машины не изменилась, то она не могла произвести никакой работы.

Но наиболее упертые изобретатели могли бы возразить: «Почему вы так уверены в законе сохранения энергии? Что делает этот закон таким особенным, что он не может быть нарушен? Да, все *известные* эксперименты подтверждают закон сохранения энергии, но с чего вы решили, что поставили все *возможные* эксперименты? Эйнштейна тоже поначалу считали сумасшедшим!»

В этом возражении есть глубокий смысл. Мы не должны ничего принимать на веру. Все учебники убеждают студентов в том, что энергия сохраняется, причем некоторые делают это даже заглавными буквами и полужирным шрифтом. И мы начинаем верить в то, что это фундаментальный закон и что он справедлив для всех видов энергии. Но редко кто пытается объяснить студенту, *почему* энергия должна сохраняться. Эмми Нётер дает на этот вопрос очень простой ответ, и мне досадно, что многие преподаватели не идут дальше простой констатации закона сохранения. Если не объяснять человеку, откуда берутся те или иные физические законы, он начинает представлять себе физику как некий свод сакральных правил, понимание которых доступно только посвященным.

Так почему же энергия сохраняется? Теорема Нётер говорит нам, что это должно быть как-то связано с одной из симметрий природы. Я напому вам, что смысл симметрии состоит в том, что если мы выполняем какое-то преобразование, то после него все по-прежнему выглядит так же, как и до преобразования. Так вот, закон сохранения энергии связан с одной очень важной симметрией, которая делает возмож-

ным существование физики. Мы считаем, что законы природы будет завтра такими же, как сегодня, а сегодня они такие же, как были вчера. Если бы это было не так, нам пришлось бы иметь разные законы физики на каждый день недели.

Поэтому мы считаем, и это в определенной степени предположение — но я обращаю ваше внимание: *проверяемое* предположение, — что все законы природы *инвариантны* (то есть остаются неизменными) относительно времени. Это такой причудливый способ сказать, что они одинаковы, независимо от того, *когда* мы их проверяем. Но, согласившись с таким предположением, можно строго (то есть математически) показать, что должна существовать некая величина, которую мы называем словом «энергия», не изменяющаяся с течением времени. Таким образом, открыв какой-нибудь новый закон природы, мы не обязаны проверять все его следствия на предмет выполнения закона сохранения энергии. Все, что требуется от нового закона, — это чтобы он не менялся с течением временем.

Как можно проверить наше предположение? Ну, во-первых, мы можем убедиться в том, то энергия действительно сохраняется. Но одно это вряд ли убедит сумасшедшего изобретателя, однако есть и другой способ. Мы можем проверить, как ведут себя законы физики с течением времени, и убедиться, что их предсказания не меняются. Этого достаточно, чтобы гарантировать сохранение энергии. Но, помимо этого нового метода проверки закона сохранения энергии, мы узнали кое-что гораздо более важное, а именно что отказ от закона сохранения энергии равносильно отказу от однородности времени. Если мы решим не верить в то, что энергия сохраняется, то будем обязаны поверить в то, что законы природы меняются с течением времени.

С другой стороны, по крайней мере на космологическом временном масштабе, различные законы природы действительно могут изменяться. В конце концов, Вселенная расширяется и меняется, и возможно, каким-то образом законы микромира связаны с макроскопическим состоянием Вселенной. Подобная идея была предложена в 1930 году Дираком.

Существует несколько очень больших чисел, характеризующих видимую Вселенную, как то: ее возраст, размер, количество элементарных частиц в ней и так далее. Есть также несколько подозрительно малых чисел, как, например, относительная величина силы гравитационного взаимодействия. Дирак предположил, что, возможно, сила гравитационного притяжения изменяется по мере расширения Вселенной, ослабевая со временем! Это естественным образом могло бы объяснить, почему гравитация сегодня настолько слаба по сравнению с другими фундаментальными взаимодействиями. Вселенная попросту стара!

С тех пор как Дирак выдвинул свою гипотезу, предпринималось множество как прямых, так и косвенных попыток проверить, меняется ли со временем сила тяжести или другие фундаментальные взаимодействия. В результате были установлены очень жесткие ограничения на возможные изменения фундаментальных констант, и убедительных признаков их изменения обнаружено не было. Правда, одна исследовательская группа, основываясь на наблюдениях спектров удаленных галактик, показала, что сила электромагнитного взаимодействия, возможно, изменилась за последние 10 миллиардов лет на $1/100\,000$, но в настоящее время нет независимых подтверждений этих результатов, которые, по мнению многих физиков, могут объясняться

сложными взаимодействиями излучающих атомов. С другой стороны, наблюдаемое количество легких элементов, образовавшихся в момент Большого взрыва, хорошо совпадает с теоретическими предсказаниями, сделанными с использованием сегодняшних значений фундаментальных констант. Это, в частности, означает, что сила гравитации могла измениться не более чем на 20 % за 13 с лишним миллиардов лет, прошедших с того момента, когда Вселенной была всего лишь одна секунда от роду! Таким образом, насколько мы можем судить, сила гравитации со временем не меняется.

Тем не менее, даже если законы микромира как-то связаны с макроскопическим состоянием Вселенной, мы все равно могли бы ожидать, что основные физические принципы, связывающие законы микромира с состоянием Вселенной, будут оставаться неизменными. А в этом случае у нас всегда остается возможность обобщить наше определение энергии так, чтобы она по-прежнему сохранялась. В конце концов, мы вольны подразумевать под энергией *нечто*, отличное от того, что подразумеваем сегодня, обобщив это представление на случаи больших и малых масштабов. Но это *нечто*, которое мы теперь будем называть словом «энергия», по-прежнему будет сохраняться до тех пор, пока указанные принципы не меняются с течением времени.

Концепция энергии неоднократно пересматривалась в истории физики. Наиболее яркий пример предоставляет нам теория относительности. Напомню, что в теории относительности разные наблюдатели могут получать различные, но одинаково правомочные результаты измерения физических величин. Результаты этих измерений должны рассматриваться исключительно в привязке к конкретному наблюдателю, но не как абсолютные значения.

Описывая Вселенную в целом или описывая систему, в которой гравитационные эффекты очень сильны, мы должны использовать обобщенное понятие энергии, согласующееся с искривленным пространством-временем. Однако если мы рассматриваем процессы, происходящие на масштабах, которые малы по сравнению с размером видимой части Вселенной или вдали от сильных гравитационных полей, то локальная кривизна пространства-времени оказывается небольшой. В этом случае мы можем использовать традиционное определение энергии. Это, в свою очередь, демонстрирует мощь закона сохранения энергии в космических масштабах, закона, который определяет судьбу Вселенной.

Как сказал Исаак Ньютон, «все, что поднимается, должно падать». Не желая оскорбить мэтра, все же следует заметить, что это неверно. Мы знаем из опыта, что космическому аппарату можно придать такую скорость, что он никогда не упадет обратно на Землю. Существует определенная, одинаковая для любого тела скорость, необходимая для того, чтобы тело навсегда улетело от Земли. Если бы это было не так, американская лунная программа оказалась бы гораздо более сложной, поскольку в конструкции космического корабля пришлось бы явным образом учитывать вес каждого астронавта. За существование такой универсальной скорости *убегания* отвечает закон сохранения энергии.

Мы можем разбить энергию любого тела, движущегося в гравитационном поле Земли, на две части. Первая часть зависит от скорости тела. Чем быстрее оно летит, тем больше энергия его движения, называемая *кинетической энергией* — от греческого слова κίνησις — движение. Покоящиеся тела обладают нулевой кинетической энергией. Вторая часть энергии, которую тело может иметь в гравитационном поле,

называется *потенциальной энергией*. Если рояль висит на веревке на высоте пятнадцатого этажа, мы знаем, что он имеет большой потенциал причинить нам неприятности. Чем выше что-то поднято над землей, тем больше его потенциальная энергия и тем более серьезными могут быть потенциальные последствия его падения.

Чаще всего потенциальная энергия двух взаимодействующих тел представляется отрицательным числом. Это просто соглашение, но за ним стоят практические соображения. Логично считать, что покоящееся тело, находящееся на бесконечном удалении от Земли или любого другого массивного тела, обладает нулевой полной энергией. Так как кинетическая энергия покоящегося тела равна нулю, его потенциальная энергия также должна быть нулевой. Но поскольку при приближении к притягивающему объекту потенциальная энергия тела уменьшается, то она должна становиться все более и более отрицательной, по мере того как расстояние между телом и притягивающим объектом уменьшается.

Если мы будем придерживаться этого соглашения, то две части полной энергии любого тела, движущегося в гравитационном поле, например вблизи поверхности Земли, будут иметь противоположные знаки: одна будет положительной, другая отрицательной. Мы можем затем задаться вопросом, является ли их сумма положительной или отрицательной. Это важнейший вопрос. Если энергия сохраняется, то тело, полная энергия которого отрицательна, никогда не сможет покинуть околоземное пространство. Смотрите: если тело улетает «на бесконечность» и там замедляется до полной остановки, это означает, что его полная энергия равна нулю. Ноль больше любого отрицательного числа, и это значит, что если полная энергия тела

отрицательна, то на конечном расстоянии от Земли оно остановится и начнет падать обратно. Если полная энергия тела изначально отрицательна, то она не может стать ни нулевой, ни положительной — так требует закон сохранения энергии. Скорость, при которой первоначальная (положительная) кинетическая энергия в точности равна (отрицательной) потенциальной энергии, так чтобы полная энергия была равна нулю, это и есть *вторая космическая скорость*. Тело, обладающее второй космической скоростью, способно удалиться от Земли на бесконечное расстояние. Поскольку обе формы энергии прямо пропорциональны массе тела, то вторая космическая скорость оказывается не зависящей от его массы. Например, вторая космическая скорость на поверхности Земли равна 11,2 км/с.

Если Вселенная *однородна* и *изотропна*, то есть все места в ней одинаковы и все направления равноправны, то вопрос о том, будет ли Вселенная расширяться вечно, эквивалентен вопросу, будут ли отдельные галактики вечно удаляться друг от друга. В случае, если во Вселенной нет неизвестных экзотических видов энергии типа энергии пустого пространства, к которой мы еще вернемся, то вопрос о вечности расширения Вселенной сводится к вопросу о том, вернется или не вернется на землю сброшенное вверх тело. Тогда, если относительные скорости удаления галактик друг от друга достаточно велики для того, чтобы преодолеть их взаимное притяжение, то есть если суммарная кинетическая энергия всех галактик по абсолютной величине больше их суммарной потенциальной энергии (что означало бы, что их полная суммарная энергия положительна), то они будут удаляться друг от друга вечно. Если их кинетическая энергия уравновешивается их потенциальной энергией, то полная энергия

всех галактик будет равна нулю. В этом случае галактики будут удаляться друг от друга вечно, но их скорости будут уменьшаться, стремясь к нулю на бесконечном расстоянии. Если вы помните, именно этот случай соответствует плоской Вселенной. Таким образом, если мы живем в плоской Вселенной, то ее полная энергия — сумма потенциальной и кинетической энергии всех тел во Вселенной — равна нулю. Это особое значение полной энергии как одна из причин того, что Вселенная плоская, достаточно интересно.

Как я уже говорил, приведенные выше аргументы основываются на разумном предположении, что во Вселенной не существует никаких экзотических видов энергии типа энергии пустого пространства. Однако, как мы уже имели возможность убедиться, это разумное предположение на самом деле неверно. Наличие такой энергии в один момент перечеркивает все наши теоретические построения, потому что, в зависимости от ее знака, открытая Вселенная может сменить в будущем свое расширение на сжатие или, наоборот, закрытая Вселенная может расширяться бесконечно. Но фундаментально наличие дополнительной энергии ничего не меняет, если только мы правильно ее подсчитаем и добавим в формулу для полной энергии Вселенной. И эта новая полная энергия Вселенной по-прежнему будет однозначно определять ее будущее.

Рассмотрим, например, ту Вселенную, в которой мы живем и которая, как нам представляется, является плоской. Если она обладает нулевой полной суммой потенциальной и кинетической энергии вещества, но дополнительно обладает еще какой-то энергией вакуума, то она будет расширяться вечно, и скорость ее расширения будет увеличиваться со временем. Что из этого следует? Если расширение происходит с ускорением, то на это должна затрачиваться допол-

нительная энергия. Но дополнительная энергия должна откуда-то закачиваться в расширяющуюся Вселенную, чтобы поддерживать ускоренное расширение, несмотря на то, что полная энергия вещества в ней остается нулевой...

В конце концов закончится история Вселенной Большим коллапсом или она рассеется в пространстве, зависит от ее энергии, неважно: экзотической или какой-то иной. Ответ на один из самых древних вопросов человеческого существования: «Чем все закончится?» — может быть получен путем измерения скорости расширения видимой части Вселенной, определения ее общей массы и, наконец, выяснения природы и вычисления общего количества возможной «темной энергии». Мы не будем знать, в каких единицах следует считать количество энергии, до тех пор, пока не выясним характер и природу таинственной темной энергии, составляющей в настоящее время 70 % всей энергии Вселенной. Но в конечном итоге судьба Вселенной прояснится с помощью простого бухгалтерского подсчета ее энергии.

* * *

Рука об руку с инвариантностью относительно сдвига во времени идет еще одна важная симметрия. Точно так же, как законы природы не зависят от того, *когда* вы их проверяете, они не должны зависеть от того, *где* вы их проверяете. Представьте себе кошмар студентов, если бы законы физики зависели от того, в каком университете им читается курс, и более того, от того, в какой аудитории физического факультета им пришлось бы сдавать экзамен!

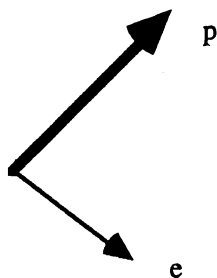
Следствием этой симметрии является существование еще одной сохраняющейся физической величины, называемой *импульсом*, с которой большинство из вас знакомы благодаря

явлению инерции, отвечающей за то, что тело, предоставленное само себе, сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения. Закон сохранения импульса фактически тождественен первому закону Ньютона. Декарт назвал импульс «количеством движения» и предложил, что это количество было зафиксировано во Вселенной Богом в акте творения. Сегодня мы понимаем, что это закон сохранения импульса обязан своим существованием тому, что законы физики не изменяются при перемещении из одного места Вселенной в другое.

Но так было не всегда. В 1930-х годах был период, когда казалось, что придется отказаться от закона сохранения импульса, по крайней мере, для элементарных частиц, и вот почему. Закон сохранения импульса говорит нам, что если система находится в состоянии покоя и вдруг распадается на несколько частей, например если взрывается бомба, то все осколки бомбы не могут лететь в одном направлении. Это и так интуитивно понятно, но на основании закона сохранения импульса это можно доказать строго.

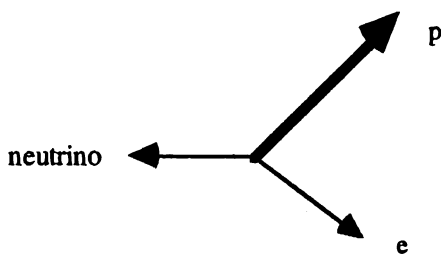
Если первоначальный импульс равен нулю, а у системы, находящейся в состоянии покоя, он равен нулю, то он должен оставаться нулевым, пока на систему не подействует какая-нибудь внешняя сила. Но взрыв происходит из-за действия внутренних сил, а не внешних, поэтому единственный способ обеспечить полный нулевой импульс — это потребовать, чтобы все осколки разлетались равномерно по разным направлениям. Если частица распадается на две одинаковые части, то эти части должны разлетаться строго в противоположных направлениях с одинаковыми скоростями. Если же распад происходит на две разные частицы, то их скорости тоже будут разными, но разлетаться они все равно будут в противоположных направлениях.

И вот, когда в 1932 году был открыт *нейтрон*, оказалось, что в свободном состоянии он нестабилен и распадается примерно через десять минут. Нейтрон распадается на протон и электрон, которые могут быть обнаружены, например, по следам, которые они оставляют в камере Вильсона. И тут обнаружилось, что при распаде покоящегося нейтрона образующиеся в результате протон и электрон разлетаются не в противоположные стороны, как того требует закон сохранения импульса, а примерно так, как показано на рисунке:



Таким образом, встал вопрос: применим ли закон сохранения импульса для элементарных частиц? В конце концов, никто в то время не представлял себе характера сил, отвечающих за распад нейтрона. Но мысль о том, что придется пожертвовать законом сохранения импульса, а заодно и законом сохранения энергии, который, судя по всему, тоже нарушался в этом процессе, была настолько чудовищной, что один из выдающихся физиков того времени Вольфганг Паули предложил другой вариант. Он предположил, что при распаде нейтрона, помимо протона и электрона, образуется еще одна частица. Это частица должна быть нейтральной, во-первых, потому что она не оставляет след в камере Вильсона, а во-вторых, потому что этого требует закон сохранения

электрического заряда. К тому же эта частица должна быть очень легкой, потому что сумма масс протона и электрона почти равна массе нейтрона. Итальянский физик Энрико Ферми предложил назвать новую частицу *нейтрино*, что на итальянском языке означало «нейтрончик». Это та самая частица, о которой я рассказывал ранее в связи с ядерными реакциями, обеспечивающими светимость Солнца. Если в процессе распада нейтрона действительно образуется нейтрино, то можно предсказать направление, в котором эта частица должна вылетать, чтобы скомпенсировать суммарный импульс протона и электрона:



Вы могли бы возразить, что «изобретение» незамеченной до сих пор частицы выглядит легкомысленным поступком, но Паули был не тем человеком, которого можно было бы обвинить в легкомысленности. Он к тому времени уже сделал важный вклад в физику, известный как «принцип запрета Паули», определяющий особенности поведения электронов в атомах, благодаря которым возможно существование известных нам химических элементов и их соединений. Этот австрийский гений порой приводил в трепет своих коллег. Всем была известна его привычка вскакивать с места во время семинара и выхватывать мел из рук докладчика, если, по его мнению, докладчик нес чепуху. Кроме того, идея отказа

от законов сохранения импульса и энергии, которые прекрасно работали во всех прочих разделах физики, представлялась гораздо более радикальным шагом в отношении творческого плагиата, о котором я рассказывал ранее, чем введение новой частицы. Так нейтрино прописался в физике задолго до того, как он был экспериментально обнаружен в 1956 году.

Сегодня, конечно, мы бы с еще большей подозрительностью отнеслись к идее отказа от закона сохранения импульса, даже в микромире, потому что считаем его следствием одной из фундаментальных симметрий природы. До тех пор, пока не обнаружится новый закон природы, который каким-то образом будет зависеть от положения в пространстве, мы можем рассчитывать на незыблемость закона сохранения импульса. И конечно же, он выполняется не только на субатомном масштабе. Этот закон обуславливает наше понимание таких макроскопических явлений, как футбол, бейсбол, катание на коньках или вождение автомобиля. Что бы ни происходило внутри изолированной системы, на которую не действуют никакие внешние силы, суммарный импульс всех составных частей этой системы всегда остается неизменным в течение неограниченного времени.

Где же найти такую изолированную систему? Ответ: везде. Все зависит только от вашего выбора! Есть один мультфильм, в котором двое ученых спорят перед доской, исписанной уравнениями, и один говорит другому: «Да, но я не думаю, что помещение этих уравнений в рамку делает их единой теорией». Однако в этой шутке есть доля истины. Все, что необходимо сделать, чтобы получить изолированную систему, это нарисовать вокруг нее воображаемую рамку. Вся хитрость заключается в правильном выборе этой рамки.

Рассмотрим следующий пример. Автомобиль врезается в кирпичную стену. Сначала нарисуйте рамку вокруг автомобиля и назовите то, что находится внутри, изолированной системой. Первоначально автомобиль движется с постоянной скоростью, он не разгоняется и не тормозит. Внезапно на его пути оказывается стена, которая останавливает его. Так как импульс автомобиля при столкновении уменьшается до нуля, стена должна приложить силу к выбранной вами системе, то есть к автомобилю. Стене придется приложить тем большую силу, чем больше была первоначальная скорость автомобиля.

Теперь нарисуйте рамку вокруг автомобиля и стены. В этой новой системе никакие внешние силы уже не действуют. Единственное, что действует на автомобиль, это стена, и единственное, что действует на стену, это автомобиль. Что происходит с этой точки зрения, когда автомобиль врезается в стену? В отсутствие внешних сил полный импульс системы должен сохраняться, то есть оставаться постоянным.

Изначально автомобиль двигался и имел некоторый импульс, а стена находилась в состоянии покоя, и ее импульс был равен нулю. После аварии и автомобиль и стена покоятся. Куда делся импульс? Факт, что ситуация выглядит так, будто импульс бесследно исчез, говорит нам о том, что в системе до сих пор чего-то не хватает, а именно стена и автомобиль не являются изолированной системой. Стена стоит на Земле. Понятно, что импульс может сохраниться в этом столкновении, только если сама Земля примет на себя импульс, которым первоначально обладал автомобиль. И действительно, настоящая изолированная система состоит из автомобиля, стены и Земли. Поскольку Земля обладает несравнимо большей массой, чем автомобиль, ей не нужно двигаться

с заметной скоростью, чтобы поглотить его импульс, тем не менее Земля пусть и на ничтожную величину, но изменит скорость своего движения. Так что в следующий раз, когда кто-то скажет вам, что он сдвинул Землю, будьте уверены: он на самом деле это сделал!

* * *

Поиск симметрий является мощным движителем физики. Действительно, все скрытые реальности, о которых пойдет речь в последней главе, связаны с различными симметриями Вселенной. Те симметрии, которые я уже описал, относящиеся к сохранению энергии и импульса, называются *пространственно-временными симметриями* по той очевидной причине, что они отражают неизменность физических законов относительно пространства и времени и тем самым отличаются от прочих симметрий. Пространственно-временные симметрии неразрывно связаны со специальной теорией относительности, которая, объединяя пространство и время, связывает их в единый пространственно-временной континуум, что приводит к появлению новых симметрий, отсутствующих при рассмотрении пространства и времени по отдельности. Одной из таких новых пространственно-временных симметрий является инвариантность скорости света.

Инвариантность законов физики относительно перехода из одной движущейся системы в другую в теории относительности достигается путем установления новых отношений между пространством и временем. Новая, четырехмерная, пространственно-временная «длина» остается неизменной при переходе от равномерно движущейся системы к неподвижной, так же как обычная трехмерная длина остается неизменной при повороте. Эта новая сим-

метрия возможна только в том случае, если пространство и время связаны друг с другом. Таким образом, вместо чистого сдвига в пространстве и чистого сдвига во времени, инвариантность которых отвечает за сохранение импульса и сохранение энергии, мы должны ввести что-то новое, сохраняющее инвариантность при сдвиге в четырехмерном пространстве-времени.

Таким образом, в теории относительности сохранение энергии и сохранение импульса оказываются не отдельными независимыми законами, а соединяются в новый единый закон сохранения *энергии-импульса*. Сохранение этой новой величины, требующей переопределения прежних понятий энергии и импульса, использовавшихся в теории Ньютона, является следствием новой симметрии, в которой пространство и время связаны друг с другом. В этом смысле специальная теория относительности сообщает нам нечто новое: пространство-время таково, что мы не можем обеспечить сохранение энергии без сохранения импульса, и наоборот.

Существует еще одна пространственно-временная симметрия, о которой я пока упомянул только вскользь. Она связана с симметрией, приводящей к сохранению энергии-импульса в специальной теории относительности, но гораздо лучше знакома нам, поскольку проявляется и в трехмерном пространстве. Это симметрия относительно вращения.

Я уже описывал ситуацию, в которой различные наблюдатели видят различную длину проекции линейки, в зависимости от того, как эта линейка повернута относительно экрана, но при этом длина самой линейки остается неизменной. Независимость физических законов от того, в какую сторону повернута лаборатория, является проявлением этой важней-

шей симметрии природы. Мы не ожидаем, например, что природа предпочитает какое-то одно направление другим. Все направления должны быть равноправны в отношении основных законов природы.

Тот факт, что физические законы инвариантны относительно поворотов, означает, что существует какая-то сохраняющаяся величина, связанная с этой симметрией. Сохранение импульса связано с инвариантностью законов природы относительно сдвига в пространстве, в то время как наша новая величина связана с инвариантностью законов природы относительно поворота на произвольный угол. Эта величина называется *моментом импульса*, или, для краткости, просто *моментом*.

Как и сохранение импульса, сохранение момента играет важную роль во всех явлениях от субатомных до космологических масштабов. В любой изолированной системе момент импульса должен сохраняться. Если в описании любого процесса, связанного с сохранением импульса, заменить расстояние на угол, а скорость на угловую скорость, мы получим описание для процесса, связанного с сохранением момента. Это прекрасный пример творческого плагиата.

Еще один пример. Когда один вагон сталкивается с другим, находящимся в состоянии покоя, и вагоны сцепляются вместе, так что дальше оба вагона движутся как единое целое, они движутся медленнее, чем первый вагон до столкновения. Это классическое следствие сохранения импульса. Суммарный импульс двух сцепленных вагонов должен быть таким же, как и до столкновения. Поскольку совокупная масса сцепки больше, чем масса первого вагона, который двигался, сцепка из двух вагонов должна двигаться медленнее, чем первоначально двигался один вагон.

А теперь рассмотрим фигуристку, вращающуюся вокруг вертикальной оси с прижатыми к телу руками. Когда она расправляет руки, ее вращение замедляется, как по мановению волшебной палочки. Этот пример демонстрирует следствие сохранения момента импульса, так же как предыдущий пример демонстрировал следствие сохранения импульса. Продолжая аналогию, можно сказать, что тело большего радиуса ведет себя в отношении вращения, как тело с большей массой — в отношении движения. Расправляя руки, фигуристка как бы увеличивает радиус своего тела. И подобно тому, как два сцепленных вагона начинают двигаться медленнее, чем до столкновения двигался один, так и фигуристка, увеличивая размах рук, начинает вращаться медленнее, чем она вращалась, прижав руки к телу. И наоборот, начав вращение с раскинутыми в стороны руками, фигуристка может ускорить вращение, прижав руки к телу. Так закон сохранения момента импульса помогает фигуристам завоевывать олимпийские медали.

В природе есть и другие сохраняющиеся величины, законы сохранения которых возникают из симметрий, отличных от пространственно-временных. К таким величинам относится, например, электрический заряд. Я вернусь к этому позже. Сейчас же попробуем разобраться с еще одним странным аспектом инвариантности законов природы относительно поворота. Он имеет отношение к одной особенности инвариантности вращения, которая проявляется не всегда. Например, несмотря на то что основные законы движения инвариантны относительно поворота, то есть не существует предпочтительного направления, в котором бы законы выполнялись как-то иначе, чем в остальных, мир относительно поворота не инвариантен. Если бы он был инвариантен, мы не смогли бы дойти даже до продуктового магазина,

потому что все направления были бы для нас одинаковыми. Но «лево» выглядит иначе, чем «право», «север» отличается от «юга», «верх» от «низа».

Проще всего объяснить это простым стечением обстоятельств, тем более что так оно и есть. Если бы мы жили в другом месте, то различия между правым и левым, югом и севером были бы для нас совершенно другими. Тем не менее сам факт, что случайное стечение обстоятельств может скрыть от нас фундаментальные симметрии мира, является одной из наиболее важных идей, направляющих развитие современной физики. Чтобы использовать всю мощь таких симметрий, мы должны копать глубже.

Многие из классических примеров скрытой реальности, о которых я рассказывал в предыдущей главе, связаны с идеей, что симметрия может быть скрытой. Эта идея получиластораживающее имя: *спонтанное нарушение симметрии*, и мы уже столкнулись с подобным нарушением в разнообразных обличиях.

Хорошим примером служит поведение микроскопических «магнетиков» в куске железа, о котором я рассказывал в конце предыдущей главы. При низкой температуре, когда отсутствует внешнее магнитное поле, эти «магнетики», выбирая наиболее энергетически выгодное состояние, выстраиваются в одном направлении, но само направление выбирается случайным образом. В физике электромагнетизма нет ничего, что определяло бы это направление, его нельзя предсказать заранее. Но после того, как направление выбрано, оно приобретает уникальность. Насекомое, чувствительное к магнитным полям, живя внутри такого магнита, будет чувствовать анизотропию своего мира, для него направления на северный полюс магнита и на южный полюс

магнита будут выделенными, отличающимися от остальных направлений.

Физический подход позволяет подняться выше случайных, уникальных обстоятельств нашего собственного существования и попытаться выглянуть за их пределы. Во всех известных мне случаях это предполагает поиск истинной симметрии мира. В приведенном выше примере это будет означать, что уравнения, описывающие магнитное поле, должны быть инвариантны относительно поворота, то есть они не должны меняться в случае изменения направления магнитного поля.

Аналогичная ситуация возникает при объединении электромагнитных и слабых взаимодействий. Лежащая в основе электрослабой теории физика не делает различий между безмассовыми фотонами и очень массивными Z бозонами. В действительности, существует глубоко запрятанная симметрия, при которой Z бозон можно заменить на фотон, и все будет выглядеть точно так же. В мире же, в котором мы живем, у описывающих эти частицы фундаментальных уравнений существуют конкретные решения, содержащие конденсат виртуальных частиц, заполняющий пустое пространство, взаимодействуя с которым фотон и Z бозон ведут себя совершенно по-разному.

На языке математики эти результаты можно изложить следующим образом: конкретное решение математического уравнения не обязано сохранять инвариантность относительно тех преобразований, для которых являются инвариантными сами исходные уравнения. Любые конкретные реализации базовой математической модели, например описание реального окружающего нас физического мира, могут нарушать связанную с этой моделью симметрию. Рассмотрим

прекрасный пример спонтанного нарушения симметрии, предложенный физиком Абдусом Саламом, одним из лауреатов Нобелевской премии за объединение электромагнитного и слабого взаимодействия.

Представьте себе полностью симметричный сервированный круглый обеденный стол. Между тарелками на этом столе стоят рюмки, причем расстояние от каждой рюмки до правой тарелки равно расстоянию до левой тарелки. Ничто, кроме правил этикета (которые я никак не могу запомнить), не указывает на то, какую рюмку следует выбрать: правую или левую. Но как только кто-нибудь один из гостей делает свой выбор, скажем берет левую рюмку, все остальные оказываются вынужденными последовать его примеру, в противном случае у кого-то из гостей окажется две рюмки, а у кого-то — ни одной. В отношении реального физического мира можно сказать, что мы случайным образом оказались в какой-то одной из огромного количества его возможных реализаций. Перефразируя Руссо: мир был рожден свободным, но он повсюду скован цепями!

Почему же нас должны волновать существующие в природе симметрии, даже те, которые не проявляются явно в нашем мире? Может быть, тяга к симметриям — это всего лишь извращенная потребность физиков испытывать странное эстетическое удовольствие от подобной интеллектуальной мастурбации? Частично да. Но есть еще одна причина. Симметрии, даже те, которые непосредственно не проявляются, позволяют полностью определить набор физических величин, необходимых для описания природы, и динамические отношения между этими величинами. Короче, вся физика может в итоге оказаться не более как набором симметрий и больше ничем.

Возьмем, к примеру, энергию и импульс, сохранение которых является прямым следствием двух пространственно-временных симметрий. Эти две симметрии достаточны для описания движения тел в гравитационном поле Земли, полностью эквивалентного описанию, получающемуся на основании законов Ньютона. Вся динамика, например тот факт, что сила приводит к ускорению, следует из этих двух симметрий. Симметрии даже определяют характер фундаментальных взаимодействий, о чем я скоро расскажу.

Симметрия говорит нам, какие переменные необходимы для описания мира. Как только список переменных определен, построение теории остается делом техники. Возьмем снова моего любимого сферического коня. Представляя коня в виде сферы, я ограничиваю круг тех физических процессов, которые буду рассматривать, только теми, которые зависят исключительно от расстояния до центра коня и больше ни от чего. Все, что явно зависит от направления, должно быть удалено из описания, поскольку все направления из центра для сферы идентичны. Совершенная симметрия сферы превратила задачу с потенциально большим количеством параметров в задачу с единственной переменной — радиусом.

Можно подойти с другой стороны. Если бы мы сумели выделить переменные, необходимые для надлежащего описания какого-то физического процесса, то затем, если мы достаточно умны, мы могли бы попробовать угадать, какие внутренние симметрии связаны с этими переменными. Эти симметрии, в свою очередь, могли бы помочь нам сформулировать все законы, отвечающие за процесс. Вспомним Галилея. Он показал, что изучение того, *как* движется тело, помогает понять, *почему* оно движется. Определения скоро-

сти и ускорения позволяют понять, что нам нужно для описания динамики движущихся тел. Теперь же мы просто делаем следующий шаг, предполагая, что изучаемые законы не просто становятся более понятными, когда мы ограничиваем число входящих в них переменных, но что этих выбранных переменных оказывается достаточно, для того чтобы построить полное описание явления.

Вернемся к фейнмановской аллегории природы как больших шахмат, в которые играют боги, за игрой которых мы имеем честь наблюдать. Правила игры мы называем фундаментальными законами физики, и наша цель — понять эти правила. Фейнман утверждал, что понимание этих правил — это все, на что мы имеем право надеяться, собираясь понять природу. Но я думаю, сегодня мы имеем право претендовать на еще один шаг вперед. Мы подозреваем, что эти правила могут быть полностью установлены путем простого изучения симметрии «фигур» и «доски». Таким образом, чтобы понять природу, то есть чтобы понять правила игры, достаточно понять ее симметрию.

Это очень сильное утверждение и вместе с тем очень общее. Я предполагаю, что вы сейчас испытываете одновременно скепсис и растерянность, поэтому приведу несколько примеров, которые помогут прояснить ситуацию. В процессе я надеюсь дать некоторое представление о том, как физика расширяет свои границы.

Итак, вернемся к фейнмановской аналогии. Шахматная доска представляет собой довольно симметричный объект. Узор доски переходит сам в себя при пространственной трансляции. Клетки доски окрашены в два цвета, и, если мы поменяем цвета местами, узор останется тем же самым. Кроме того, доску размером 8×8 можно разделить на две

половины, и если потом эти половины поменять местами, то внешний вид доски тоже не изменится.

Одной этой симметрии еще недостаточно, чтобы установить правила шахматной игры, потому что на той же самой доске можно играть, например, в шашки. Однако если к указанной симметрии добавить факт наличия на доске тридцати двух фигур, разделенных на два множества, в каждом из которых есть восемь одинаковых фигур (пешки), три парные фигуры (кони, слоны и ладьи) и две уникальные (ферзь и король), произвол в определении правил уменьшится. Например, можно подметить зеркальную симметрию в расположении ладей, коней и слонов, которые стоят симметрично относительно центральной линии. Противоположные цвета фигур противников напоминают о противоположных цветах разных клеток доски. Кроме того, набор ходов всех шахматных фигур согласуется с простым набором движений, допускаемых структурой доски. Движение слона, ходящего только по диагонали, ограничивается возможностью двигаться только по клеткам одного цвета. Пешка может «взять» другую фигуру, только если та находится на клетке того же цвета по диагонали от пешки, и так далее. Я никоим образом не утверждаю, что правила шахматной игры полностью определяются симметрией доски и фигур; стоит отметить, что, хотя ФИДЕ признает только один вариант игры, в пределах описанных симметрий существует множество ее неофициальных вариаций.

Можно задаться аналогичным вопросом относительно любого другого вида спорта. Остались бы правила футбола теми же самыми, если бы игроки играли не на 100-метровом, а на 10-метровом поле? Как зависят правила от симметрии в отношении играющих команд? Или, например, что будет, если поле для игры в бейсбол будет иметь форму пятиугольника? Потребуется ли вам четыре «аута»?

А если не ограничиваться только видами спорта? Насколько сильно зависят законы страны от структуры законодательного органа? Или вот многие беспокоятся о величине военных расходов. Насколько структура оборонного бюджета определяется структурой вооруженных сил, состоящих из ВВС, армии, флота и морской пехоты?

Возвращаясь к физике, я хочу продемонстрировать, как симметрия, даже неявная, позволяет устанавливать формы физических законов. А начну я с одного закона сохранения, который мы еще не обсуждали, но который играет важную роль в физике, — с закона *сохранения электрического заряда*. Все известные нам процессы в природе идут с сохранением электрического заряда, то есть если в начале процесса мы имеем один элементарный отрицательный заряд, то, независимо от того, насколько сложен этот процесс, в его конце останется один элементарный отрицательный заряд. В промежутке между началом и концом может рождаться и уничтожаться множество заряженных частиц, но при рождении и уничтожении частиц электрические заряды возникают только попарно: положительный и отрицательный, и так же попарно уничтожаются, чтобы суммарный заряд в начале процесса был равен суммарному заряду в конце.

Предположив, основываясь на теореме Нётер, что любой универсальный закон сохранения является следствием соответствующей универсальной симметрии, мы могли бы превратить все положительные заряды в мире в отрицательные, а отрицательные в положительные, и ничего при этом не должно было бы измениться. Но это эквивалентно заявлению, что названия положительных и отрицательных зарядов являются результатом произвольного соглашения: мы просто договорились называть заряд электрона отрицательным, а заряд протона положительным.

В самом деле, симметрия, ответственная за сохранение заряда, схожа с пространственно-временной симметрией, которая уже обсуждалась в связи с общей теорией относительности. Если, например, мы одновременно изменим все линейки во Вселенной, так чтобы прежнее расстояние в 1 см соответствовало новому расстоянию в 2 см, то мы вправе ожидать, что законы физики будут выглядеть точно так же, как и раньше, с единственной разницей, что нам придется изменить численные значения фундаментальных констант, чтобы они соответствовали новому масштабу. Это эквивалентно использованию для описания физических процессов разных систем единиц. Мы можем использовать мили и фунты, принятые в США, или же метрическую систему, принятую в цивилизованном мире. Кроме неудобства перевода одних единиц в другие, никаких других изменений во Вселенной это не вызовет.

Но что произойдет, если я потребую, чтобы длина линейки изменялась при ее перемещении в пространстве? Ну... Эйнштейн обещает нам, что ничего плохого не случится. Это просто означает, что законы, управляющие движением частиц в таком мире, будут учитывать наличие гравитационных полей.

Общая теория относительности говорит нам, что есть такая общая симметрия, которая позволяет нам изменять определение длины от точки к точке, но с условием, что мы соглашаемся с существованием такой вещи, как гравитационное поле. В этом случае мы можем компенсировать локальные изменения длины наличием гравитационного поля. С другой стороны, если мы находим такое глобальное описание, в котором длина от точки к точке остается неизменной, то это говорит нам об отсутствии гравитационного поля. Эта симметрия называется *общееординатной*

инвариантностью, и она полностью определяет теорию, называемую общей теорией относительности. Общекоординатная инвариантность означает, что система координат, которую мы используем для описания пространства и времени, сама по себе может быть произвольной, так же как могут быть произвольными единицы, используемые для измерения расстояния. Но между этими случаями имеется принципиальная разница. Разные системы координат могут быть эквивалентны, только если преобразование между ними производится *локально*, то есть если эталон длины плавно изменяется от точки к точке. Такое преобразование требует введения для некоторых наблюдателей гравитационного поля, чтобы предсказания движений тел оставались для них одними и теми же.

Дело тут в следующем: в странном мире, в котором определение длины изменяется от точки к точке, траектория тела, движущегося в отсутствие внешних сил, будет искривленной. Помните пример с самолетом, летящим по кратчайшему пути? Его траектория при проекции на плоскую карту будет выглядеть кривой линией. Для того чтобы согласовать такое движение с классической механикой, необходимо ввести в плоской системе координат дополнительную силу, которая сворачивает самолет с прямого пути. В искривленном четырехмерном пространстве-времени эта сила и есть сила тяжести. Другими словами, в общей теории относительности гравитация является следствием общекоординатной инвариантности природы.

Это вовсе не означает, что гравитация является плодом нашего воображения. Общая теория относительности говорит нам, что присутствие массы искривляет пространство. В этом случае все выбираемые нами системы координат должны так или иначе учитывать эту кривизну. Один

локальный наблюдатель может отказаться от учета силы тяжести, например, если он свободно падает или находится на орбите Земли. Космонавт может заявить, что на борту космической станции нет никакой гравитации, но земной наблюдатель будет видеть, как станция вместе с космонавтом перемещается по криволинейной траектории. Он может либо считать, что на станцию действует сила земного притяжения, либо что пространство вокруг Земли искривлено, а станция летит по инерции, и из-за кривизны пространства ее траектория выглядит кривой. Мы вольны выбрать любую из точек зрения. Покоясь на поверхности Земли, наблюдатель испытывает действие силы тяжести. Свободно падающий наблюдатель его не испытывает. Однако движение тел в обоих случаях будет отражать кривизну пространства, которая является реальной и которая вызвана присутствием материи.

Гравитационное поле можно считать «вымышленным» в том смысле, что от него можно избавиться подходящим выбором системы координат, но это возможно только в том случае, если все пространство, в котором разворачиваются события, плоское, то есть если рядом нет никакой материи. Одним из таких примеров являются вращающиеся системы координат типа центрифуги, в которой тренируют космонавтов и летчиков на перегрузки. Находящийся внутри кабины центрифуги испытуемый может представить себе, что существует гравитационное поле, которое увеличивает его вес, хотя на самом деле никакой дополнительной массы, способной создать дополнительное гравитационное поле, рядом нет. С другой стороны, техник, обслуживающий центрифугу, видит, что кабина движется по окружности и что присутствующее внутри кабины гравитационное поле является следствием неудачного выбора испытуемым

системы координат. В этом случае кривизна является реальной, а гравитационное поле — кажущимся.

Я начал говорить об электрическом заряде, а в итоге отвлекся на гравитацию. Теперь я хочу сделать для электрического заряда то, что я сделал для длины в пространстве-времени. Существует ли симметрия, позволяющая мне локально произвольно выбрать знак электрического заряда так, чтобы при этом предсказания физических законов остались теми же? Ответ: да, но только если существует некое поле, действующее на частицы, которое способно «скомпенсировать» мой локальный выбор подобно тому, как гравитационное поле «компенсирует» произвол в выборе системы координат. Поле, являющееся результатом такой симметрии природы, это не электромагнитное поле, как вы могли бы подумать. Это новое поле является аналогом кривизны пространства-времени. Оно присутствует вблизи заряда, подобно тому как кривизна пространства присутствует вблизи массы. Это поле играет в электромагнетизме такую же роль, как гравитация в теории относительности, и называется *электромагнитным векторным потенциалом*.

Странная симметрия, позволяющая локально изменить определение заряда или определение длины за счет введения дополнительных сил, называется *калибровочной симметрией*. Я уже упоминал о ней в предыдущей главе. Присутствие этой симметрии в различных формах в общей теории относительности и в теории электромагнетизма сподвигло Германа Вейля на попытку объединить обе теории. Как мы вскоре увидим, калибровочная симметрия носит гораздо более общий характер. Сейчас же я хочу подчеркнуть, что такая симметрия, во-первых, *требует* наличия в природе различных сил и, во-вторых, говорит нам, какие физические величины являются «настоящими» физическими величи-

нами, а какие представляют собой просто «артефакты» выбора системы отсчета. Подобно тому, как угловые координаты на сфере являются избыточными, если все, что нас интересует, зависит только от радиуса сферы, так и калибровочная симметрия в каком-то смысле сообщает, что электромагнитное поле и кривизна пространства-времени являются «настоящими» физическими сущностями, а гравитационное поле и векторный потенциал зависят от точки зрения наблюдателя.

Экзотический язык калибровочной симметрии можно было бы рассматривать лишь как дань математической педантичности, если бы он использовался только для описания уже установленных фактов. В конце концов, законы гравитации и электромагнетизма были изучены задолго до открытия калибровочной симметрии. Но оказалось, что эта симметрия очень важна для дальнейшего развития физики. В течение последних десятилетий мы обнаружили, что все известные силы в природе являются результатом калибровочных симметрий. Это, в свою очередь, дало нам новое понимание многих вещей, казавшихся раньше непонятными. Обнаружение калибровочных симметрий, связанных с фундаментальными взаимодействиями, позволило физикам установить физические величины, ответственные за эти взаимодействия.

Общим свойством калибровочной симметрии является требование существования неких полей, способных действовать на больших расстояниях, которые бы «компенсировали» свободу выбора некоторых свойств частиц или пространства-времени так, чтобы при этом не изменялись основные физические законы. В общей теории относительности таким полем является гравитационное, в электромагнетизме — электромагнитное, которое, в свою очередь,

определяется векторными потенциалами. Однако слабое взаимодействие между частицами в атомных ядрах действует только на очень коротких расстояниях. Как же оно может быть связано с калибровочной симметрией?

Решением является *спонтанное нарушение симметрии*. Тот же самый фон виртуальных частиц в пустом пространстве, который заставляет Z бозоны проявлять свойства массивных частиц, а фотоны оставляет безмассовыми, может физически реагировать на *слабый заряд* частицы, то есть на заряд, который позволяет частице участвовать в слабом взаимодействии. По этой причине слабый заряд не может быть произвольно изменен локально. Если бы, например, во всем пространстве существовало фоновое электрическое поле, мы не могли бы произвольно заменить положительный заряд отрицательным, потому что действующие на них со стороны фонового поля силы были бы направлены в противоположные стороны, и симметрия между положительным и отрицательным электрическим зарядами оказалась бы скрыта этим фоновым электрическим полем.

Так вот, спонтанно нарушенные калибровочные симметрии полностью скрыты от нас. Как я уже говорил, фоновый конденсат виртуальных частиц в пустом пространстве приводит к тому, что W и Z бозоны обретают массу, а фотоны остаются безмассовыми. Проявление нарушенной калибровочной симметрии заключается в существовании массивных частиц, которые являются переносчиками *короткодействующих взаимодействий*. Открытие нарушения фундаментальных симметрий позволило по-новому взглянуть на короткодействующие взаимодействия и изучить их сходство с далекодействующими взаимодействиями — гравитационным и электромагнитным. Это в эвристическом смысле позволило посмотреть на теорию слабого взаимо-

действия как на кузину квантовой электродинамики, и тогда Фейнман и Мюррей Гелл-Манн разработали феноменологическую теорию, в которой слабое взаимодействие было представлено в той же форме, что и электромагнитное, и изучили ее следствия. За следующее десятилетие им удалось построить теорию, объединяющую оба взаимодействия. Одним из главных предсказаний новой теории было не наблюдавшееся ранее свойство слабого взаимодействия. В отличие от уже известного процесса, при котором нейтральный нейтрон распадается на две заряженные частицы — положительный протон и отрицательный электрон, теория предсказывала и процесс, при котором не происходило никаких изменений заряда, подобно тому, как электромагнитная теория предсказывает взаимодействие двух электронов без изменения их зарядов. Это «нейтральное взаимодействие» было экспериментально обнаружено в 1970-х годах. Возможно, это был первый случай обнаружения симметрии, которая предсказала существование нового взаимодействия, а не объяснила его задним числом.

Слабость слабого взаимодействия объясняется тем, что связанная с ним калибровочная симметрия спонтанно нарушается. В результате, на масштабах, больших, чем среднее расстояние между частицами в фоновом конденсате, который определяет свойства W и Z бозонов, эти бозоны оказываются очень тяжелыми, что ослабляет переносимое ими взаимодействие. Если в природе существуют другие, еще не открытые калибровочные симметрии, нарушающиеся на еще более малых масштабах, то порождаемые ими взаимодействия должны быть еще более слабыми и короткодействующими, и, возможно, именно по этой причине они до сих пор не открыты. Не исключено, что в природе существует бесконечное количество таких симметрий, а возможно, и нет.

Если так, то возникает следующий актуальный вопрос: все ли взаимодействия в природе должны быть результатом спонтанно нарушенных калибровочных симметрий? Нет ли какой-нибудь иной причины для существования взаимодействий? Мы пока еще недостаточно хорошо это понимаем. Может быть, такая причина существует, а может быть, и нет.

Дело в том, что все теории, которые не предусматривают калибровочной симметрии, оказываются «больны» внутренней математической несогласованностью. После того как в таких теориях должным образом учитываются все квантово-механические эффекты, оказывается, что теория содержит бесконечное количество физических параметров. Но любая теория с бесконечным количеством параметров — это вовсе не теория! Калибровочная симметрия выступает ограничителем количества переменных, необходимых для описания физики явления, подобно тому как сферическая симметрия выступает ограничителем количества переменных, необходимых для описания коня. Таким образом, для сохранения физического и математического здоровья различных взаимодействий им, в первую очередь, необходимы хорошие калибровочные симметрии.

Вот почему физики, изучающие элементарные частицы, одержимы симметриями. На фундаментальном уровне симметрии не просто описывают Вселенную; они определяют, что в этой Вселенной возможно, а что нет, то есть формируют саму физику. Тенденция к спонтанному нарушению симметрии, по крайней мере на сегодняшнем уровне развития теории, всегда проявляется одинаково: симметрия, нарушенная на макроскопических масштабах, является ненарушенной на микроскопических. Чем на меньших расстояниях мы исследуем Вселенную, тем более симметричной она выглядит.

Если мы захотим применить к природе человеческие понятия о простоте и красоте, то калибровочные симметрии будут одним из видов проявления такой красоты. Порядок есть симметрия.

Соображения симметрии подвели нас к самым границам наших знаний о мире. Но в последние десятилетия они начали толкать нас далеко за пределы этих границ, провоцируя физиков заниматься выяснением, какие симметрии могли бы объяснить, почему Вселенная является такой, какой мы ее наблюдаем, и выдвигать совершенно новые концепции физической реальности.

Частью физиками движет идея соединения электромагнетизма и гравитации, об одной из попыток которого я уже рассказал, упомянув Германа Вейля. Но несмотря на то что обе эти силы возникают из-за локальных симметрий, между ними существует фундаментальное различие. Гравитация имеет отношение к симметрии пространства-времени, в то время как электромагнетизм и другие известные взаимодействия — нет. Сила, которую мы ощущаем как силу тяжести, отражает кривизну пространства-времени, тогда как то, что мы ощущаем как электромагнетизм, — нет.

В 1919 году молодой польский математик Теодор Калуца предположил, что, возможно, помимо четырех известных пространственных измерений существует еще одно, и задался вопросом: нельзя ли объяснить электромагнитное взаимодействие искривлением пространства в этом дополнительном ненаблюдаемом измерении?

Удивительно, но ответ оказался положительным. Как показал несколько лет спустя шведский физик Оскар Клейн, пятая координата, которую предложил Калуца, может существовать, будучи «свернутой» в очень маленькую окруж-

ность, и поэтому не наблюдаться в обычных экспериментах. Тогда искривление в четырех наблюдаемых измерениях будет наблюдаться в обычном физическом мире как гравитация, а искривление в дополнительном пятом измерении приводит к электромагнитному взаимодействию.

Казалось бы, с таким замечательным результатом Калуца и Клейн должны были затмить своей славой Эйнштейна и Дирака, но оказалось, что их теория, как бы красива она ни была, предсказывала дополнительные виды гравитационного взаимодействия, которые никогда не наблюдались. Тем не менее способ унификации, предложенный Калуцей и Клейном, оставил след в умах теоретиков, и о нем снова вспомнили в конце XX века.

В 1970-х и 1980-х годах стало ясно, что все прочие взаимодействия, так же как и электромагнитное, связаны с калибровочными симметриями, и физики вновь вернулись к поискам Святого Грааля Эйнштейна — идее объединения в одной теории всех фундаментальных взаимодействий, включая и гравитацию.

Для подробного рассказа об этом потребовалась бы целая книга, но я, к счастью, уже написал одну такую, и есть еще множество других. Достаточно сказать, что в 1984 году физики предложили расширить наши пространство-время не на одно, а, по крайней мере, на шесть дополнительных измерений, и это позволяет объединить все наблюдаемые в природе симметрии, связанные со всеми известными взаимодействиями, в том числе и с гравитацией. В результате появилась возможность создать математически последовательную теорию квантовой гравитации, что до этого момента никому не удавалось. Получившаяся теория стала извест-

на как *теория суперструн*, потому что в ее основу легло предположение, что все частицы, которые мы наблюдаем в природе, на самом деле состоят из струноподобных объектов, которые могут колебаться в этих дополнительных измерениях.

Теория струн имела свои взлеты и падения. Первоначальный успех, достигнутый в 1980-х годах, был омрачен осознанием того, что никто не в состоянии создать какой-либо вариант теории струн, который бы однозначно предсказал что-либо подобное нашему реальному физическому миру, и что для создания последовательного описания, видимо, нужны более сложные виды математических симметрий, так что, возможно, сами струны могут быть иллюзией, возникающей из более фундаментальных объектов.

На самом деле — и я еще вернусь к этому в конце книги — не исключено, что неспособность теории струн предсказать что-либо похожее на нашу Вселенную (по мнению некоторых теоретиков) может означать, что попросту не существует никакого фундаментального физического объяснения, почему Вселенная именно такая, а ее наблюдаемые свойства являются результатом простого случайного стечения обстоятельств!

Однако я начал рассказывать о дополнительных измерениях и о теории струн не для того, чтобы превозносить или хоронить ее. Я не могу быть арбитром в таком вопросе и рассказываю обо всем этом, чтобы продемонстрировать, в какие новые гипотетические миры порой загоняет теоретиков поиск симметрий. Один физик определил красоту, связанную с симметрией в дополнительных измерениях, термином «элегантность». Время покажет, присуща ли эта элегант-

ность самой природе или же она существует только в глазах смотрящего.

Опять меня унесло на границы физики высоких энергий. Есть множество примеров того, как симметрии управляют явлениями нашей повседневной жизни, никак не связанными с существованием новых сил в природе. Давайте же вернемся к ним.

Примерно до 1950 года важным разделом физики, в котором симметрия проявила себя явно, была физика кристаллов. Подобно фейнмановской шахматной доске, кристаллы характеризуются симметричным расположением атомов в жесткой кристаллической решетке. Эта симметрия находит свое отражение в завораживающей красоте алмазов и других драгоценных камней. Более непосредственное отношение к физике имеет движение электронов внутри кристаллической решетки, которое, подобно движению пешек на шахматной доске, может полностью определяться симметрией решетки. Например, тот факт, что узор решетки повторяется в пространстве с определенной периодичностью, накладывает ограничения на возможный спектр импульсов электронов, движущихся внутри решетки. Это происходит из-за того, что порядок расположения атомов в кристалле подразумевает, что вы можете произвести сдвиг системы координат только на строго определенное расстояние, чтобы кристалл в новой системе выглядел точно так же, как и в прежней. Я знаю, это немного напоминает странные скачки из «Алисы в Стране чудес», но такая периодичность влечет за собой важные физические следствия. Так как импульс связан с симметрией физических законов относительно сдвига системы координат в пространстве, факторы, накладывающие ограничения на воз-

можную величину и направление этого сдвига, приводят к тому, что набор доступных электрону импульсов оказывается ограниченным.

Этот простой факт лежит в основе работы всей современной микроэлектроники. Если поместить электроны внутрь кристаллической структуры, они будут способны свободно передвигаться, только обладая определенным набором импульсов. Это также означает, что электроны могут обладать лишь фиксированным набором энергий. Однако, в зависимости от химического состава кристалла, может случиться так, что электроны вообще не смогут перемещаться по нему, а окажутся связанными в узлах решетки. Материал будет проводить электричество только в том случае, если спектр доступных импульсов и энергий будет соответствовать энергиям, при которых электроны могут свободно переходить от одного атома к другому. В современных полупроводниках, таких как кремний, необходимая для работы электронных приборов проводимость достигается путем добавления в полупроводник определенных примесей, которые уменьшают энергию связи электронов с атомами, в результате чего проводимость материала приобретает сильную зависимость от разнообразных внешних условий.

Аналогичные механизмы, возможно, имеют отношение и к одной из величайших загадок физики конденсированных сред. Начиная с 1911 года, когда Оннес открыл сверхпроводимость ртути, и вплоть до 1987 года не было обнаружено ни одного вещества, переходящего в сверхпроводящее состояние при температуре выше 20 кельвинов. Поиски такого вещества были для физиков сродни поискам Святого Грааля для рыцарей Круглого стола. Если бы удалось обнаружить сверхпроводник, работающий, например, при ком-

натной температуре, это привело бы к революции в электротехнике. Возможность уменьшения до нуля электрического сопротивления без использования сложных охлаждающих систем привела бы к появлению в нашей жизни совершенно новых электрических устройств. И вот в 1987 году двое ученых, работавших на IBM, методом проб и ошибок обнаружили вещество, переходящее в сверхпроводящее состояние при температуре на 35 градусов выше абсолютного нуля. Вскоре были открыты и другие аналогичные материалы. К настоящему времени достигнута уже температура перехода к сверхпроводимости 100 кельвинов. Это все еще далеко от комнатной температуры, но уже выше точки кипения жидкого азота, который относительно дешев в производстве¹. Когда новое поколение высокотемпературных сверхпроводников начнет массово использоваться в промышленности, мы станем свидетелями появления совершенно новых поразительных технологий.

Самым удивительным в высокотемпературной сверхпроводимости оказалось то, что в обычном состоянии исходные вещества для этих сверхпроводников являются *изоляторами*. Без добавления примесей они вообще не проводят электрический ток.

Несмотря на отчаянные усилия тысяч физиков, четкого понимания высокотемпературной сверхпроводимости не существует до сих пор. Но первое, на чем они фокусируют свои усилия, — это на изучении симметрии кристаллической решетки таких веществ. Выяснилось, что кристаллическая структура состоит из отдельных атомных слоев,

¹ В 2015 году было обнаружено, что обычный сероводород под давлением в миллион атмосфер переходит в сверхпроводящее состояние при температуре 203 кельвина ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$), а это уже температура даже не жидкого азота, а сухого льда! — *Примеч. пер.*

которые существуют как бы независимо друг от друга. Ток может течь вдоль этого двумерного слоя, но не перпендикулярно ему. Еще предстоит выяснить, является ли этот частный вид симметрии высокотемпературных сверхпроводников ответственным за те взаимодействия, которые приводят к макроскопическому сверхпроводящему состоянию электронов, но если история чему-то учит, то приведенный пример является хорошим уроком.

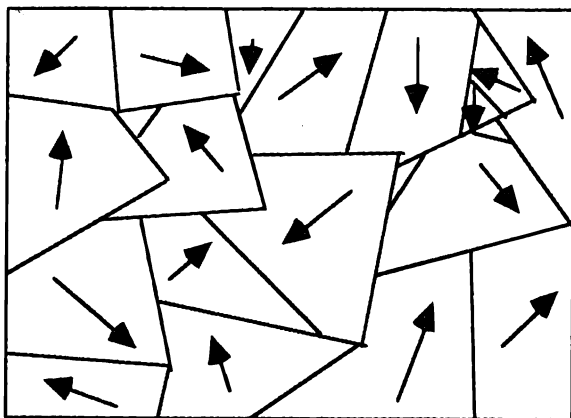
Независимо от того, сможет ли симметрия кристаллических решеток революционизировать электрические технологии, она уже сыграла немаловажную роль в революции в биологии. В 1905 году сэр Уильям Брэгг и его сын сэр Лоренс Брэгг были удостоены Нобелевской премии за замечательное открытие. Если осветить кристалл рентгеновскими лучами, длина волны которых сравнима с расстояниями между атомами, на экране появится характерный регулярный узор. Изучая этот узор, можно восстановить пространственную структуру кристаллической решетки. Новая техника исследования строения вещества получила название *рентгеноструктурный анализ*. Этот анализ стал мощным инструментом изучения пространственной конфигурации атомов в разных материалах, особенно в сложных органических веществах, молекулы которых могут состоять из десятков тысяч атомов. Наиболее важным результатом применения этой техники стало открытие Уотсоном и Криком структуры двойной спирали ДНК.

Физика конденсированных сред не ограничивается технологическими разработками. С ее помощью были исследованы глубокие соотношения между симметрией и динамикой процессов, что привело к новому пониманию фазовых переходов. Я уже рассказывал, что вблизи определенных критических значений некоторых параметров, таких как темпера-

тура или магнитное поле, совершенно разные материалы проявляют схожие шаблоны поведения. Это происходит из-за того, что микроскопические особенности строения вещества в критической точке становятся неактуальными, и ответственность за все берет на себя симметрия.

Вода в критической точке и намагниченное железо в критической точке ведут себя похожим образом по двум причинам. Во-первых, флуктуации в критической точке происходят одновременно на всех масштабах, например, ни в каком объеме невозможно сказать о воде, в каком состоянии она находится: в жидком или в газообразном. Поскольку вещество выглядит одинаково на всех масштабах, локальные микрофизические свойства, такие как структура молекул, теряют свою актуальность. Во-вторых, все, чем характеризуется состояние воды в критической точке, это ее плотность, и даже не столько плотность, сколько отклонение плотности от средней величины в большую или в меньшую сторону. То есть вода в критической точке может быть полностью описана при помощи двух чисел: $+1$ и -1 , и то же самое касается характеристики намагниченности железа в его критической точке.

Обе эти причины неразрывно связаны с симметрией. Вода и намагниченное железо в критической точке в некотором смысле подобны шахматной доске. Существуют только две степени свободы: черный и белый цвет клеток, повышенная или пониженная плотность, направление намагниченности вверх или вниз. Но ведь так бывает не всегда. Основной параметр, характеризующий возможные состояния системы вблизи критической точки, может иметь больше степеней свободы, например иметь величину и направление. Такая система будет выглядеть вблизи своей критической точки следующим образом:



Вы можете подумать, что основные характеристики поведения такого материала вблизи критической точки будут отличаться от поведения воды или идеализированного куска намагниченного железа, и будете правы. Но в чем состоит главное различие между этим рисунком и рисунком, приведенным на странице 199? В наборе возможных значений параметра, описывающего фазовый переход. А что характеризует этот набор возможных значений? Основные симметрии этого *параметра порядка*. В зависимости от типа симметрии параметр порядка может принимать значения, соответствующие, например, координатам точки на окружности, на прямой, на сфере, в квадрате, в треугольнике и так далее.

Таким образом, мы опять видим, как симметрия определяет динамику процесса. Характер фазового перехода в критической точке полностью определяется характером параметра порядка. Но сам параметр порядка ограничен его симметрией. Вещества с одинаковой симметрией параметра порядка, претерпевая фазовый переход в критической точке, ведут

себя одинаково. И в этом случае симметрия полностью определяет физику.

Такое использование симметрии позволяет нам увидеть подобие между физикой конденсированных сред и физикой элементарных частиц. На приведенном выше рисунке показано не что иное, как типичный пример спонтанного нарушения симметрии. Параметр порядка — вектор, характеризующий направление локальных магнитных полей, — может принимать любые направления. Он обладает внутренней круговой симметрией. После выстраивания элементарных «магнитиков» в одном направлении эта симметрия нарушается, спонтанно выбирая какое-то одно направление.

В приведенном выше примере в критической точке это направление постоянно меняется, и это происходит на всех масштабах, поэтому в критической точке все направления равноправны и симметрия не нарушена. Но вдали от критической точки система будет находиться в какой-то одной конфигурации, это может быть, например, жидкая вода или намагниченный в каком-то одном направлении кусок железа. В физике элементарных частиц мы поступаем похожим образом, описывая конфигурацию основного состояния Вселенной — вакуум — как некую когерентную конфигурацию элементарных полей, имеющих в этом состоянии некоторые фиксированные значения. Параметром порядка в этом случае являются величины самих элементарных полей. Если в низшем энергетическом состоянии они имеют ненулевое значение, то частицы, которые взаимодействуют с этими полями, будут вести себя иначе, чем частицы, которые с ними не взаимодействуют. Тогда существовавшие ранее симметрии, характеризующие эти элементарные частицы, нарушатся.

В итоге симметрия, проявляющаяся на малых масштабах, на которых флуктуации фоновых полей слишком сильны, чтобы согласованно влиять на поведение частиц, нарушается на больших масштабах, где локальные флуктуации усредняются. Кроме того, считается, что нарушенные ныне симметрии были ненарушенными на очень ранней стадии Большого взрыва, когда Вселенная была очень мала и крайне горяча. При расширении Вселенной в ней произошел фазовый переход, аналогичный переходу воды в жидкое состояние, когда температура опускается ниже критической точки. При достаточно высокой температуре могут проявляться нарушенные в обычном состоянии симметрии, потому что параметр порядка, характеризующий состояния элементарных полей, при высокой температуре обладает большим числом степеней свободы.

Сегодня принято считать, что для каждой известной нам симметрии существуют такие условия, в которых она нарушается, приводя к «фазовому переходу» в состоянии Вселенной. Большая часть сегодняшних исследований в области космологии посвящена изучению последствий таких фазовых переходов. И мы опять приходим к тому, что все в этом мире управляется симметрией.

Возвращаясь на Землю, мы обнаруживаем, что симметрия играет решающую роль в фазовых переходах, которые управляют поведением обычных веществ. Мы уже убедились, что симметрия параметра порядка воды, магнита или овсяной каши способна полностью определить поведение этих веществ в критических точках. Но, возможно, наиболее сильной из известных симметрий, определяющей саму нашу возможность описать эти переходы, является симметрия, с описания которой я начал эту книгу. Эта симметрия называется *масштабной инвариантностью*.

Главной особенностью любого вещества в критической точке является одинаковость его свойств на всех масштабах. Вещество становится масштабно-инвариантным: оно выглядит одинаково, независимо от того, под каким увеличением мы его рассматриваем. Это очень специфическое свойство, настолько специфическое, что им не обладают даже сферические кони!

Напомню, что я сумел сделать важные выводы биологического характера, рассматривая, как меняются свойства сферических коней при изменении их размера. Если бы соответствующая им физика оставалась масштабно-инвариантной, она разрешала бы существование сферических коней любой величины. Но это не так, потому что материал, из которого изготовлены кони, не изменяет свою плотность при увеличении размера коня. Из-за этого вес коня увеличивается пропорционально кубу его размера, в то время как сила его мышц растет пропорционально лишь квадрату размера.

Но вещества в критической точке фазового перехода масштабно-инвариантны. Схематические изображения структуры воды и магнита остаются одинаковыми, независимо от того, какой объем вещества мы рассматриваем. Взяв микроскоп с большим увеличением, мы увидим точно такую же картину, как и невооруженным глазом. Из-за этого только модель очень и очень специфического вида будет должным образом описывать такую систему вблизи критической точки. Интересная математика таких моделей привлекла в последние годы большое число теоретиков. Если, например, классифицировать все возможные модели, обладающие масштабной инвариантностью, то на основе этого можно затем классифицировать все возможные критические явления в природе. Таким образом, одно из самых сложных в микроскопическом масштабе явлений, оказывается, может быть

полностью описано масштабной-инвариантной моделью — ну, если и не описано, то, по крайней мере, понято. Многие из тех, кто заинтересовался масштабной инвариантностью, ранее занимались физикой элементарных частиц. Это вселяет надежду, что окончательная теория всего, если только ее когда-нибудь создадут, возможно, будет основана на масштабной инвариантности.

В конце главы я хочу рассказать, где еще нас подстерегает симметрия. Как я говорил, теория струн — это одна из немногих областей, в которой можно вживую наблюдать научный прогресс на границе наших знаний о мире, когда сдвиг парадигмы рождает новые реалии. Это та область физики, где я могу говорить не только о давно известных вещах, но и о совершенно не исследованных. Как я уже сказал, вопросы, которыми задаются физики, часто связаны с симметриями, которые мы пока полностью не понимаем. Итак, вот несколько конкретных примеров.

В этой главе я сделал несколько неявных предположений об устройстве природы, которые кажутся сами собой разумеющимися. Например, я предположил, что природе не важно, где и когда мы решили ее изучать, а из этого предположения следуют два наиболее важных ограничения, накладываемых на физический мир: законы сохранения энергии и импульса. Кроме того, несмотря на то что любой из вас безошибочно ответит, какая из его рук является правой, а какая левой, природе это вроде безразлично. Будет ли физика отраженного в зеркале мира такой же, как и наша? На первый взгляд напрашивается ответ, что да. Однако представление физиков о том, что можно считать «первым взглядом», резко изменилось в 1956 году. Для того чтобы объяснить загадочное явление, имеющее отношение к ядерному распаду, два молодых американских теоретика китайского происхождения

предположили невозможное: не исключено, что природа способна отличать правое от левого! Это предположение было тут же проверено. Для этого экспериментаторы взяли ядро атома кобальта, испытывающее бета-распад (когда один из нейтронов ядра превращается в протон, испуская электрон и антинейтрино), и поместили его в магнитное поле. Если бы зеркальная инвариантность выполнялась строго, то количество электронов, вылетающих в одном направлении, было бы равно количеству электронов, вылетающих в другом. Вместо этого оказалась, что число электронов, вылетающих направо, отличается от числа электронов, вылетающих налево. Четность, или равноправие правого и левого, оказалась нарушенной для слабого взаимодействия, ответственного за бета-распад!

Это стало полным шоком для физического сообщества. Два физика, Чжэндао Ли и Чжэньнин Янг, были удостоены Нобелевской премии в течение года после их предсказания. Нарушение четности, как теперь известно, является неотъемлемой особенностью теории слабого взаимодействия, и причина этого состоит в том, что нейтрино — единственная среди всех элементарных частиц, участвующая только в слабом взаимодействии (насколько мы знаем), — обладает очень специфическим свойством. Частицы, подобные нейтрино, электронам, протонам и нейтронам, обладают собственным моментом импульса, называемым *спином*, то есть ведут себя так, будто они вращаются вокруг своей оси, в том смысле, что во взаимодействиях с другими частицами они действуют как маленькие волчки или гироскопы. Если частица заряжена, то ее вращение приводит к тому, что она становится маленьким магнитиком, имеющим северный и южный полюс. Для движущегося электрона направление его внутреннего магнитного поля может быть произвольным по

отношению к направлению движения. Нейтрино же, являясь нейтральной частицей, лишенной внутренней структуры, не может иметь внутреннего магнитного поля, но обладает спином, имеющим направление. Нарушение четности слабого взаимодействия происходит из-за того, что в бета-распаде рождаются только такие нейтрино, направление спина которых совпадает с направлением их движения. Мы называем такие нейтрино «левыми». Никакого глубокого физического смысла в этом нет. Это просто произвольное соглашение.

Мы понятия не имеем, существуют ли в природе «правые» нейтрино. Если да, то они по каким-то причинам не должны участвовать в слабом взаимодействии, иначе мы бы их давно обнаружили. Но это не означает, что они не могут существовать. Теоретики показали, если бы нейтрино обладали массой, то весьма вероятно, что «правые» нейтрино могли бы существовать. Если бы вдруг обнаружилось, что любые нейтрино имеют ненулевую массу, то это было бы прямым указанием на то, что нам нужна какая-то новая физика, выходящая за рамки Стандартной модели. Именно по этой причине возник огромный интерес к экспериментам по регистрации нейтрино, образующихся в ходе ядерных реакций в недрах Солнца. Было показано, что если наблюдаемый дефицит солнечных нейтрино не является ошибкой эксперимента, то одним из наиболее вероятных объяснений является наличие у нейтрино ненулевой массы. Последние эксперименты свидетельствуют в пользу того, что так оно и есть, а это значит, что мы открываем перед собой совершенно новое поле исследований. Нарушение четности, которое потрясло мир, но теперь стало центральной частью нашей модели, теперь указывает нам направление, в котором следует искать еще более фундаментальные законы природы.

Вскоре после обнаружения нарушения четности было обнаружено нарушение еще одной очевидной симметрии природы. Это симметрия между частицами и античастицами. Ранее считалось, что античастицы во всех отношениях идентичны соответствующим частицам, за исключением, скажем, электрического заряда, так что, если мы заменим все частицы в мире их античастицами, такой мир ничем не будет отличаться от нашего. Хотя отличить частицу от античастицы не всегда просто, потому что некоторые нейтральные частицы тождественны своим античастицам, и мы можем отличить одни от других только по их участию в ядерных реакциях. В 1964 году было обнаружено, что одна из таких частиц, называемая *нейтральным каоном*, распадается с нарушением симметрии между частицами и античастицами. Опять же виновником оказалось слабое взаимодействие. Сильное же взаимодействие между кварками, из которых состоят каоны, как показали независимые эксперименты, сохраняет четность и симметрию между частицами и античастицами с высокой точностью.

Однако в 1976 году Герард 'т Хоофт в одной из своих многочисленных новаторских теоретических работ продемонстрировал, что общепринятая теория сильного взаимодействия — квантовая хромодинамика — все-таки приводит к нарушению как четности, так и симметрии между частицами и античастицами. Чтобы примирить результат 'т Хоофта с экспериментом, который убедительно демонстрировал сохранение симметрии между частицами и античастицами в сильном взаимодействии, были предложены несколько теоретических решений, но на сегодняшний день мы понятия не имеем, являются ли какие-либо из них правильными. Наиболее интересный вариант предполагает возможность существования новых элементарных частиц, называемых *аксионами*. Если они существуют, то вполне могут оказаться основными

компонентами темной материи, на которую приходится большая часть массы Вселенной. Если аксионы будут обнаружены, мы одним выстрелом убьем двух зайцев: решим проблему сохранения симметрии между частицами и античастицами в сильных взаимодействиях и заткнем дыру в нашем представлении об устройстве Вселенной. Если мы сделаем подобное открытие, соображения симметрии окажутся нашей путеводной звездой.

Имеется огромное множество различных симметрий, которые существуют или не существуют в природе по причинам, которых мы пока не понимаем. Они служат питательной средой, на которой растут современные теоретические исследования. В физике элементарных частиц остается еще много нерешенных проблем: почему существуют три поколения элементарных частиц, два из которых ничем не отличаются от первого поколения, за исключением того, что входящие в них частицы тяжелее? Почему массы частиц в каждом поколении различаются? Почему так отличаются силы слабого и гравитационного взаимодействий? Сегодня стало традиционным для физиков рассматривать эти вопросы в рамках симметрий, но с высоты нашего опыта все-таки неразумно ожидать, что ответы на них будут похожими на те, которые мы уже получили.

Глава 6

ЭТО НЕ ЗАКОНЧИТСЯ, ПОКА НЕ ЗАВЕРШИТСЯ

Мы не притязаем на то, что портрет, нарисованный нами здесь, правдоподобен; скажем одно — он правдив.

Виктор Гюго. Отверженные

Мне особенно нравится одна сцена из фильма Вуди Аллена, в которой персонаж, одержимый вопросом о смысле жизни и смерти, навещает своих родителей и, рыдая, молит их наставить его на путь истинный. На что его отец поднимает глаза и отвечает: «Не спрашивай меня о смысле жизни. Я не знаю даже, как работает тостер!»

В этой книге я тоже постарался подчеркнуть, возможно, не так убедительно, как Вуди Аллен, тесную связь между почти что эзотерическими вопросами, возникающими перед уче-

ными на переднем крае исследований, и физикой повседневных явлений. Поэтому мне представляется уместным в этой последней главе порассуждать, к каким новым открытиям может привести эта связь в XXI веке. Историческая встреча на Шелтер Айленде, состоявшаяся более полувека назад, изменила отношения между любимыми возможными будущими открытиями и нашими существующими теориями. Ее результатом стала глубокая, но незаметная перестройка нашего мировоззрения. Никто не способен объективно сказать, существует ли окончательный ответ на основной вопрос жизни, Вселенной и всего остального. Однако современная физика подвела нас к пониманию, почему, по крайней мере в буквальном смысле, это не имеет значения.

Я собираюсь рассмотреть здесь вопрос о том, что же направляет наши мысли о будущем физики по тому или иному пути и почему. Большую часть этой книги я посвятил рассказам про то, как физики оттачивали свои инструменты для построения нашей сегодняшней картины мира. Я сделал это не в последнюю очередь потому, что именно эти инструменты будут определять подход к тем вещам, которые нам еще предстоит понять. По этой причине, совершив полный круг, я собираюсь вернуться туда, откуда мы начали: к аппроксимации и масштабированию.

Физика имеет будущее только в той мере, в которой существующие теории являются неполными. Давайте зададимся вопросом: какими свойствами обладала бы полная физическая теория, если бы у нас такая была? Простейший ответ будет почти тавтологией: теория является полной, если она предсказывает все явления, для предсказания которых она была создана. Но обязательно ли такая теория является истинной и, что еще более важно, обязательно ли истинная теория является полной? К примеру, истинна ли ньютонов-

ская теория гравитации? Она предсказывает движение планет вокруг Солнца и движение Луны вокруг Земли с огромной точностью. Ее можно использовать для взвешивания Солнца с погрешностью меньше чем одна миллионная. Кроме того, законы Ньютона позволяют рассчитывать движение тел вблизи поверхности Земли с точностью до одной стомиллионной. Но при предсказании угла, на который отклоняется луч света, проходящий вблизи Солнца, она дает ошибку в два раза!

Правильный результат получается, если вместо ньютоновской механики воспользоваться общей теорией относительности, обобщающей ее на случай больших скоростей и сильных гравитационных полей. Таким образом, теория, основанная на законе всемирного тяготения Ньютона, является неполной. Но является ли она неистинной?

Ответ кажется очевидным. В конце концов, мы можем экспериментально измерить отклонения от предсказаний закона Ньютона. С другой стороны, в нашей повседневной жизни все предсказанные законом Ньютона явления выполняются с величайшей точностью, и мы можем сказать, что в том мире, в котором мы непосредственно обитаем, закон Ньютона является истинным. Давайте тогда предположим, что истинная и полная теория должна находиться в полном согласии со всем, что мы знаем о мире. Сегодня закон Ньютона, конечно, не соответствует этому критерию. Однако по крайней мере до конца XIX века он ему соответствовал. Был ли он тогда истинным? Зависит ли научная истина от времени?

Юристы могут упрекнуть меня в том, что моему второму определению недостает формальной строгости. Мне следовало бы заменить слова «все, что мы знаем» на слова «все,

что существует». Но это также бесполезно! Подобное определение уплывает из области науки в область философии — мы никогда не сможем его применить, ведь мы никогда не знаем, знаем ли мы обо всем, что существует. Все, что мы можем знать, — это только то, что мы знаем! Проблема кажется неразрешимой, но она имеет одно важное, часто недооцениваемое следствие, заключающееся в том, что мы никогда не можем доказать истинность чего-либо; мы можем доказать только ложность. Это очень важная идея, которая лежит в основе всего научного прогресса. Как только мы сталкиваемся с тем, что теория, которая давала правильные предсказания на протяжении тысячелетий, расходится с опытом, это оказывается сигналом, что нам нужно либо расширять, либо заменять теорию.

Здесь имеется гораздо более глубокая и, надеюсь, менее семантическая проблема, входящая в число тех вопросов, на которых я хотел бы сосредоточиться в этой главе. Что в принципе означает, что некая теория является истинной. Рассмотрим квантовую электродинамику (КЭД), теорию, завершённую после встречи на Шелтер Айленде. Примерно за двадцать лет до этого молодой Дирак вывел свое релятивистское уравнение. Это уравнение правильно описывало все, что на тот момент было известно об электронах, но при его решении возникала неприятная математическая расходимость, и эта проблема была внесена в повестку дня совещания на Шелтер Айленде. В конечном итоге Фейнман, Швингер и Томонага представили математически согласованный метод решения уравнения Дирака, который позволял получать предсказания, полностью согласующиеся со всеми экспериментами. В течение десятилетий после эпохального совещания все эксперименты демонстрировали блестящее согласие с предсказаниями теории. На сегодняшний день

КЭД — это наиболее хорошо подтвержденная из всех физических теорий. Сделанные на ее основе расчеты согласуются с экспериментальными данными до девятого знака после запятой! Мы никогда не имели более точной теории, чем КЭД.

Но можно ли сказать, что КЭД является полной теорией взаимодействия электронов и фотонов? Разумеется, нет. Например, мы знаем, что если рассматривать достаточно высокоэнергетические процессы с участием массивных W и Z бозонов, то КЭД становится частью более общей теории — теории электрослабого взаимодействия. То есть на данном этапе КЭД сама по себе неполна.

Это не досадная случайность. Даже если бы W и Z бозонов не существовало, а электромагнетизм и гравитация были единственными известными нам силами в природе, мы все равно не могли бы назвать КЭД полной теорией электронов и фотонов. Потому что, как стало понятно спустя несколько лет после совещания в Шелтер Айленде, это утверждение без последующего уточнения не имеет физического смысла.

Соединение теории относительности и квантовой механики, первым успешным примером которого является КЭД, демонстрирует, что любая теория, и КЭД в том числе, имеет смысл только в той мере, в какой мы привязываем ее к определенному масштабу. Например, имеет смысл говорить, что КЭД является полной теорией взаимодействия электронов и фотонов на расстояниях, не меньших 10^{-10} см. На таких расстояниях влияние W и Z бозонов еще не проявляется. Это может показаться мелкой придиркой, но поверьте мне, это не так.

В главе 1 я писал про необходимость согласования размерностей и масштабов с физическими измерениями. Осознание

необходимости согласовывать физическую теорию с масштабом явления — пространственным, временным или энергетическим — появилось, когда Ханс Бете сделал аппроксимацию, позволившую ему вычислить лэмбовский сдвиг спустя пять дней после совещания на Шелтер Айленде. Бете сумел избавиться от расходимости путем пренебрежения, по физическим соображениям, некоторыми эффектами.

Напомню еще раз, что сделал Бете. Теория относительности и квантовая механика подразумевают, что частицы могут спонтанно «выскакивать» из пустого пространства только затем, чтобы тут же исчезнуть, если они это делают в течение очень короткого промежутка времени, который не может быть измерен в силу принципа неопределенностей. Тем не менее расчет лэмбовского сдвига продемонстрировал, что эти частицы могут влиять на реально измеряемые свойства обычных частиц, например на свойства атома водорода. Проблема, однако, состояла в том, что учет влияния всех возможных виртуальных частиц с произвольно высокими энергиями делал расчет атома водорода математически невыполнимым. Бете утверждал, что следует исключить из расчета те виртуальные частицы, энергия которых превышает некую величину. В то время он понятия не имел, что это должна быть за величина и из каких соображений ее следует выбирать, поэтому он выбрал в качестве предельного значения энергии энергию покоя электрона.

Разработав окончательный вариант теории, Фейнман, Швингер и Томонага показали, что вклад виртуальных частиц высоких энергий действительно можно последовательным образом исключить. И их теория начала давать разумные результаты — как и должна поступать любая разумная теория. В конце концов, если бы вклад всех процессов, происходящих на расстояниях и временах, много

меньших масштаба атомных явлений, в окончательный результат был существенным, у нас не осталось бы ни малейшей надежды построить применимую на практике физическую теорию. Это все равно как если бы для описания движения мяча нам понадобилось учесть все силы, действующие на каждую молекулу мяча в течение каждой наносекунды его полета.

Со времен Галилея отбрасывание несущественного было неявным принципом построения любой физической теории. Этот принцип остается справедливым даже при выполнении очень точных расчетов. Вернемся к мячу. Даже вычисляя его положение с точностью до долей миллиметра, мы по-прежнему предполагаем, что его можно рассматривать как мяч, хотя на самом деле он представляет собой набор из примерно 10^{24} атомов, каждый из которых сложным образом колеблется и вращается относительно других атомов во время полета мяча. Однако фундаментальное свойство законов Ньютона позволяет нам разделить движение составного тела на две части: на движение центра масс, положение которого определяется как усредненное положение всех составляющих его частей, и на движение всех отдельных частей тела относительно центра масс. Обратите внимание, что центр масс не обязательно находится там, где имеется какая-нибудь масса. Например, центр масс бублика находится в середине его дырки! Если мы подбросим бублик, он может кувыркаться довольно сложным образом, но его центр масс будет двигаться по параболе, впервые рассчитанной еще Галилеем.

Таким образом, когда мы исследуем движение мяча или бублика, основываясь на законах Ньютона, мы пользуемся тем, что сегодня принято называть *эффективной теорией*. Более полная теория должна была бы включать в описание

взаимодействие кварков и электронов или, по крайней мере, атомов. Но мы можем объединять все, не вносящее вклада в окончательный результат степени свободы, во что-то, что называем мячом, под которым мы, разумеется, подразумеваем центр масс этого мяча. Описание движения всех макроскопических объектов сводится к эффективной теории движения центра масс. Эффективная теория движения мяча — это все, что нам нужно, и эта теория позволяет сделать так много, что заслуживает права считаться фундаментальной. Итак, я утверждаю, что все физические теории, по крайней мере те, которыми сегодня пользуются физики, являются эффективными теориями. Всякий раз, когда вы что-то включаете в теорию, вы чем-то пренебрегаете.

Полезность эффективных теорий была осознана еще на раннем этапе развития квантовой механики. К примеру, один из классических методов представления поведения молекул в квантовой механике, восходящий к работам 1920-х годов, состоит в разделении степеней свободы молекул на «быстрые» и «медленные». Так как ядра атомов, из которых состоят молекулы, очень тяжелые, то их отклик на действие молекулярных сил будет гораздо более слабым и медленным, чем отклик, скажем, легких электронов, быстро вращающихся вокруг ядер. В этом случае можно использовать для предсказания свойств молекул следующий алгоритм: сначала будем считать ядра неподвижными и рассчитаем движение электронов относительно них; затем позволим ядрам медленно двигаться, считая, что это движение не оказывает существенного влияния на движение электронов относительно ядер. Конфигурация электронов теперь будет плавно следовать за движением ядер, которое, в свою очередь, окажет влияние только на некий усредненный параметр электронной конфигурации. Таким образом, мы «отделяем» взаимодействие отдельных электронов от движения ядер.

Затем можно построить эффективную теорию движения атомных ядер, которая будет явно отслеживать только ядерные степени свободы, а электронную конфигурацию учитывать лишь как некий усредненный параметр. Это приближение квантовой механики известно под названием *теория Борна—Оппенгеймера*. Она напоминает классическое описание движения мяча, при котором отслеживается движение его центра масс и дополнительно учитывается вращение мяча относительно центра масс.

Возьмем другой, более свежий пример, относящийся к сверхпроводимости. Я рассказывал, как в сверхпроводнике пары электронов объединяются в когерентную конфигурацию. Для описания такого состояния вещества нет необходимости описывать каждый электрон индивидуально, поскольку для того, чтобы один электрон повел себя отличным от остальных электронов образом, требуется затратить слишком много энергии. Итак, мы имеем возможность построить эффективную теорию, которая описывала бы когерентную конфигурацию как единое целое. Такая теория, идея которой была предложена в 1935 году Фрицем Лондоном, была построена в 1950 году советскими физиками Львом Ландау и Виталием Гинзбургом. Она достоверно воспроизводит все основные макроскопические особенности сверхпроводящих материалов, включая эффект Мейснера, вызываемый тем, что фотоны в сверхпроводнике приобретают эффективную массу.

Я уже говорил, что разделение параметров задачи на существенные и несущественные переменные само по себе не является чем-то новым. Объединение квантовой механики с теорией относительности потребовало вообще выкинуть несущественные переменные, причем для того, чтобы получить конечный практический результат, потребовалось вы-

кинуть не несколько, а бесконечное количество переменных. К счастью, Фейнман с коллегами показали, что это можно делать безнаказанно.

Давайте рассмотрим этот ключевой момент на более конкретном примере столкновения двух электронов. Классическая электродинамика говорит нам, что электроны будут отталкиваться друг от друга. Если электроны первоначально движутся очень медленно, они никогда не приблизятся друг к другу на расстояние, на котором становятся существенными квантовые эффекты, и для описания движения таких электронов достаточно классической максвелловской теории. Но если они движутся достаточно быстро, чтобы сблизиться на расстояние, сравнимое с размером атома, квантово-механическое описание становится насущно необходимым.

Что «видит» электрон, реагируя на электрическое поле другого электрона? В вакууме постоянно происходит рождение и уничтожение пар частиц и античастиц. Положительно заряженные виртуальные частицы притягиваются к электрону, отрицательные — отталкиваются.

Таким образом, электрон в некотором смысле постоянно носит на себе «шубу» из виртуальных частиц. Поскольку большинство этих частиц выскакивают из вакуума на чрезвычайно короткое время и не успевают пролететь большое расстояние, размер этой шубы довольно мал. На больших расстояниях можно объединить эффект воздействия всех виртуальных частиц, просто подправив заряд электрона.

Поступая таким образом, мы складываем в единое число все микроскопические особенности электрического поля, возникающего за счет окружающей электрон шубы из виртуальных частиц. Это число представляет собой тот самый

эффективный заряд электрона, значение которого записано в школьных учебниках, — именно этот заряд мы измеряем в лабораториях и затем используем при расчетах, например, электронно-лучевых трубок.

Таким образом, заряд электрона является фундаментальной физической величиной только в той мере, в какой он описывает электрон на определенном масштабе явлений! Если электроны сближаются на расстояние, сравнимое с размером окружающей каждый из них виртуальной «шубы», то они оставляют часть этой «шубы» позади, и эффективный заряд каждого из электронов изменяется. В принципе то же самое происходит и при лэмбовском сдвиге. Это пример механизма влияния виртуальных частиц на измеряемые свойства реальных частиц, приводящего к тому, что эффективный заряд электрона оказывается разным на разных расстояниях, и мы способны зарегистрировать эту разницу экспериментально.

Если нас интересуют только результаты экспериментов, выполняемых на некоторых определенных или больших расстояниях, и соответственно на некоторых определенных или меньших энергиях электронов, то мы можем написать полную эффективную теорию, которая будет предсказывать результаты всех измерений. Эта теория будет представлять собой квантовую электродинамику с соответствующими *свободными параметрами* — зарядом электрона и т. п., привязанными к определенной шкале расстояний, определяемой требуемой точностью измерений. При всех таких расчетах мы вынуждены отбрасывать бесконечное количество информации, а именно информацию о виртуальных процессах, происходящих на расстояниях, меньших чем мы в состоянии измерить.

Может показаться чудом, что мы можем вот так запросто выбросить из теории огромное количество информации,

и какое-то время это казалось чудом даже для самих изобретателей такой процедуры, например, Фейнман называл подобный прием «заметанием мусора под ковер». Но после некоторых размышлений теоретики пришли к выводу, что если физика вообще возможна, то она и должна «работать» именно таким образом. В конце концов, информация, которую мы отбрасываем, не должна быть корректной! Каждое измерение, которое мы выполняем в нашем мире, подразумевает некоторый масштаб длины или энергии. Наши теории ограничиваются масштабом физических явлений, на которых работают наши измерительные приборы. Эти теории могут предсказывать все что угодно за пределами возможностей наших измерений, но почему мы должны принимать во внимание эти предсказания, если мы принципиально неспособны их проверить? Было бы замечательно, если бы теория, описывающая взаимодействие электронов с фотонами, давала абсолютно правильные предсказания для любых расстояний, вплоть до бесконечно малых. Но есть ли смысл в таких предсказаниях, если мы принципиально неспособны проводить измерения на сколь угодно малых расстояниях? Конечно, нет. Ведь в этом случае мы получили бы теорию, предсказывающую некие экзотические процессы, в отношении которых мы не имеем ни малейшего понятия, как их наблюдать. Поэтому разумнее выбросить из рассмотрения такие процессы, по крайней мере до тех пор, пока у нас не появится хотя бы какое-то их понимание. Если теория претендует на правильное предсказание любых явлений на любых масштабах, в то время как мы не в состоянии наблюдать что-то на этих масштабах, то это означало бы, что мы создали *теорию всего* до того, как мы создали *теорию чего-нибудь*.

Как, столкнувшись с подобной ситуацией, узнать, является ли теория «фундаментальной», то есть является ли она ис-

тинной на всех масштабах? Никак. Все известные физические теории должны рассматриваться как эффективные теории именно потому, что нам следует игнорировать последствия новых квантовых явлений, которые могут возникать на очень малых масштабах, чтобы выполнить вычисления, позволяющие определить, правильные ли предсказания дает теория на больших, доступных для непосредственного измерения масштабах.

Но, как это часто бывает, недостаток оказывается достоинством. В начале книги мы смогли вывести некоторые свойства суперконя путем масштабирования обычного коня — так же и в физике, опираясь на тот факт, что физические законы зависят от масштаба, мы в состоянии предсказать, как они должны меняться при переходе к исследованию природы на все меньших и меньших расстояниях. Сегодняшняя физика дает четкий ориентир для физики завтрашней!

Мы действительно можем заранее предсказать, когда нам потребуется новое открытие. Всякий раз, когда физическая теория предсказывает ерунду либо становится математически непоследовательной при попытке учесть последствия виртуальных квантово-механических процессов на все меньших масштабах, мы вправе ожидать открытия новых физических явлений, способных «вылечить» такое поведение теории. Развитие современной теории слабого взаимодействия является тому примером. Энрико Ферми создал в 1934 году теорию, описывающую один из видов слабого взаимодействия — бета-распад нейтрона на нейтрино, протон и электрон. Теория Ферми основывалась на эксперименте и пребывала в согласии со всеми известными данными. Однако «эффективность» его теории, созданной исключительно для описания распада нейтрона на три

другие частицы, состояла в том, что это была теория *ad hoc*¹, она не была основана ни на каких физических принципах, выходящих за пределы конкретных экспериментов.

Вскоре после создания квантовой электродинамики стало ясно, что теория Ферми принципиально отличается по своему характеру от КЭД. Когда она выходит за рамки простого бета-распада и пытается описать то, что происходит на меньших расстояниях, возникает множество проблем. Виртуальные процессы, идущие на расстояниях, в сотни раз меньших размера протона, превращают предсказания теории в полную кашу.

Это долгое время не являлось большой проблемой, поскольку в течение более чем 50 лет после создания теории Ферми ни в каких экспериментах описанные выше условия не достигались. Тем не менее теоретики загодя начали искать возможное «лекарство» для расширения модели Ферми.

Первый шаг в этом направлении был очевиден: требовалось вычислить расстояния, на которых у теории начинаются проблемы. Это расстояние оказалось примерно в 100 раз меньше, чем размер нейтрона, то есть намного меньше, чем расстояния, когда-либо ранее доступные экспериментаторам. Самый простой способ «вылечить» теорию, как я уже сказал, заключается в предположении существования новых физических процессов, идущих на таких расстояниях. Наиболее очевидным было придумать новые виртуальные частицы с массой примерно в 100 раз больше массы нейтрона. Из-за огромной массы эти частицы могут возникать только

¹ *Ad hoc* — «для данного случая», латинское выражение, используемое для обозначения решения, предназначенного для конкретной проблемы или задачи и не предназначенного для какого-либо обобщения. — *Примеч. пер.*

на очень короткое время и, соответственно, за время своего существования передвигаться на очень малые расстояния. Модифицированная таким способом теория даст на больших расстояниях — на которые новые тяжелые виртуальные частицы неспособны долететь за время своего существования — те же предсказания, что и теория Ферми.

Мы уже видели, что позитроны, являющиеся партнерами виртуальных электронов, предсказанных КЭД, могут существовать как реальные, регистрируемые частицы, если имеется достаточно энергии для их создания. Точно так же, при наличии достаточной энергии можно вытащить из виртуального состояния в реальное и сверхтяжелые частицы, необходимые для модификации теории Ферми. И действительно, W и Z бозоны с предсказанными массами были непосредственно обнаружены в качестве реальных частиц на построенном в 1984 году в Женеве ускорителе спустя двадцать пять лет после теоретического обоснования необходимости их существования.

Как я уже говорил, W и Z бозоны составляют часть того, что сегодня известно как *Стандартная модель* физики элементарных частиц, описывающая три из четырех фундаментальных взаимодействий: сильное, слабое и электромагнитное. Эта теория является кандидатом на звание фундаментальной, которой не требуется никаких новых виртуальных процессов на очень малых масштабах, кроме тех, которые уже включены в теорию. Таким образом, хотя никто на самом деле в это не верит, Стандартная модель вполне могла бы в этом смысле быть *полной* теорией. С другой стороны, ничто не запрещает существование новой физики, работающей на очень малых масштабах. Более того, имеются весьма весомые теоретические аргументы в пользу того, что такая физика должна существовать, о чем я еще расскажу.

В то время как теории, подобные теории Ферми, являются «большими», то есть дают прямые указания на необходимость их «лечения» путем введения новой физики на малых масштабах, а теории, подобные Стандартной модели, такими «болезнями» не страдают, последние тоже указывают на возможность существования новых явлений на малых масштабах, потому что они являются *масштабно-зависимыми*, а именно они чувствительны к тому, на каких характерных расстояниях мы проводим эксперименты для определения их основных параметров. В то время как мы включаем в рассмотрение процессы с участием виртуальных частиц, происходящие на все меньших и меньших расстояниях, чтобы получить согласие с измеряемыми в соответствующих экспериментах параметрами, эти параметры, по мере того как мы проникаем все глубже в структуру материи, меняются предсказуемым образом! По этой причине свойства орбитального электрона, взаимодействующего с атомным ядром, отличаются от свойств электрона, который участвует во взаимодействии с частицами внутри атомного ядра. Но самое главное, что это отличие может быть рассчитано!

Это замечательный результат. Хотя мы должны отказаться от мысли, что Стандартная модель — это единая, непрерываемая теория, применимая на всех масштабах, она порождает континуум эффективных теорий, каждая из которых применима на соответствующем масштабе, и мы можем вычислить, как они себя ведут при изменении масштаба. Имея настолько хорошо ведущую себя теорию, как Стандартная модель, мы способны предсказать, как должны измениться законы физики при изменении масштаба!

Откровение о зависимости законов физики от масштаба явлений пришло достаточно поздно и нашло отражение

в работах Кеннета Вильсона, опубликованных им в 1960-х годах. За эти работы Вильсон был удостоен Нобелевской премии. Эти идеи берут начало в физике конденсированных сред. Напомню, что масштабно-зависимое поведение материалов является важной особенностью, определяющей их свойства вблизи фазового перехода. Например, обсуждая процесс закипания воды, мы рассматривали изменение ее свойств на разных масштабах. В случайно выбранном маленьком объеме у нас может оказаться и жидкая вода, и пузырек пара, но при переходе к большим объемам локальные флуктуации усредняются и «в среднем по кастрюле» вода оказывается жидкой. То есть, переходя к большим масштабам, мы выкидываем из рассмотрения детали, существенные на меньших масштабах и несущественные на больших, если нас интересуют макроскопические свойства жидкой воды.

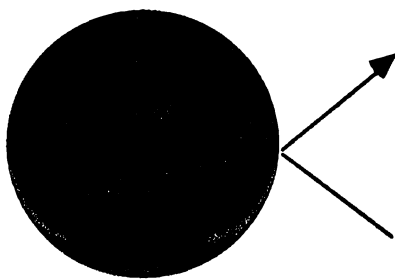
Однако если у нас есть фундаментальная теория воды, включающая описание ее поведения на малых масштабах, мы можем попытаться точно вычислить, как будет влиять на макроскопические свойства воды включение в расчет ее микроскопических свойств. Так, можно рассчитать все свойства материалов вблизи критической точки, где, как я уже говорил, становится важным масштабно-зависимое поведение вещества. Те же самые методы применимы и к описанию фундаментальных физических взаимодействий. Теории, подобные КЭД, содержат в себе семена своей собственной зависимости от масштаба.

Масштабные соображения открывают перед физиками новый мир. Я проиллюстрирую, как это происходит, на примере сферического коня из начала книги. Определив экспериментально плотность обычного коня и прочность его кожи, я затем могу предсказать свойства суперконя.

Может ли в таком случае Теория сферического коня в вакууме претендовать на роль Общей теории коней? Априори мы не можем доказать это утверждение, но у нас есть по крайней мере три различных способа его опровергнуть. Наше предположение будет ложным, если:

- ◇ на каком-то масштабе теория предсказывает ерунду;
- ◇ существует более простая модель, чем сферический конь, предсказания которой совпадают с предсказанием Теории сферического коня;
- ◇ мы можем поставить эксперимент, который на каком-то масштабе даст результат, противоречащий предсказаниям теории.

Вот пример такого эксперимента. Допустим, я бросаю в сферического коня маленький кристаллик соли. Теория предсказывает, что кристаллик отскочит от коня:



Проведя серию экспериментов с реальным конем, я обнаруживаю, что кристаллик соли отскакивает от коня не всегда. Он не отскакивает, например, если попадает коню в рот.

Точно так же изучение зависимости законов природы от масштаба явлений дает ученым в руки орудия для охоты на новые фундаментальные физические законы. Классическим

примером является история изучения слабого взаимодействия. А вот еще несколько примеров.

Масштабирование фундаментальных законов физики можно производить как «вверх», так и «вниз». В отличие от экономики, в физике оба этих метода прекрасно работают. Мы можем исследовать поведение теории на все меньших масштабах в попытке обнаружить на этом пути новые идеи. Или же, наоборот, имея теорию, описывающую то, что происходит на очень малых масштабах, недоступных нашей измерительной аппаратуре, мы можем путем усреднения мелкомасштабных флуктуаций рассчитать ее предсказания на более крупных масштабах, таких, на которых мы уже способны проверить предсказания экспериментально.

Эти два подхода охватывают весь спектр сегодняшних исследований на передовом рубеже науки. В главе 2 я описал историю создания теории сильного взаимодействия, которое связывает кварки внутри протонов и нейтронов. Важнейшую роль в ней играет идея *асимптотической свободы*. Теория сильного взаимодействия — *квантовая хромодинамика* (КХД) — отличается от КЭД эффектом, который создает облако виртуальных частиц. В КЭД этот эффект приводит к появлению «шубы», окружающей электрон и экранирующей его электрический заряд для удаленного наблюдателя. Чем ближе мы находимся к электрону, тем больший эффективный заряд мы наблюдаем. В то же время, как обнаружили Вильчек и Политцер, *сильный заряд*¹ кварка в КХД ведет себя наоборот. Чем ближе друг к другу находятся кварки, тем слабее они взаимодействуют друг с другом: «шуба» из виртуальных частиц не уменьшает, а увеличивает эффективный сильный заряд кварка для удаленного наблюдателя!

¹ В литературе этот заряд обычно называют *цветным зарядом*. — Примеч. пер.

Вооружившись теорией, правильно описывающей взаимодействие кварков на малых расстояниях, можно попытаться проследить, что происходит при увеличении масштаба. Перейдя к расстояниям, сравнимым с размерами протонов и нейтронов, путем усреднения флуктуаций, связанных с поведением отдельных кварков, можно надеяться получить эффективную теорию, описывающую поведение протонов и нейтронов. К сожалению, из-за того что взаимодействие кварков на таких расстояниях оказывается очень сильным, никому до сих пор не удалось получить хорошего согласия расчетов с экспериментом, но есть надежда, что с дальнейшим ростом вычислительных мощностей и производительности компьютеров эта задача будет в конце концов решена.

Большой успех масштабируемого подхода к теории сильного взаимодействия в начале 1970-х годов придал теоретикам смелости устремиться дальше в глубины материи, на расстояния, еще недоступные для ускорителей того времени. В этом смысле они стали последователями Льва Ландау — советского Фейнмана. В 1950-х годах этот блестящий физик уже показал, что электрический заряд электрона эффективно увеличивается при уменьшении расстояния между электроном и пробной частицей. Если быть точным, то он показал, что если экстраполировать предсказания КЭД на невообразимо малые расстояния, то эффективный электрический заряд электрона становится чрезвычайно большим. Вероятно, это был первый «звонок» к изменению КЭД, хотя в то время результат Ландау еще не воспринимался как обоснование необходимости модификации КЭД на малых масштабах.

В КЭД взаимодействие становится сильнее, по мере того как растут энергии участвующих во взаимодействии частиц, а в КХД, наоборот, с ростом энергии частиц взаимодействие

между ними ослабевает. Поведение слабого взаимодействия находится где-то посередине между этими двумя случаями. Примерно в 1975 году Говард Джорджи, Хелен Куинн и Стивен Вайнберг выполнили вычисления, которые изменили наше представление о границах высоких энергий. Они исследовали поведение сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий на различных расстояниях и получили потрясающий результат. Оказалось, что на расстояниях примерно на пятнадцать порядков меньших, чем когда-либо исследовавшихся в лабораториях, сила всех трех фундаментальных взаимодействий становится одинаковой. Именно этого можно было бы ожидать, если бы в природе существовала какая-то новая, неизвестная ранее симметрия, проявляющаяся на указанных расстояниях.

Идея о существовании такой симметрии, имеющей отношение ко всем трем фундаментальным взаимодействиям, была независимо от Джорджи высказана Глэшоу. Представление о том, что с уменьшением масштаба Вселенная должна становиться все более симметричной, идеально согласуется с этим открытием. Так началась эпоха теории Великого объединения, в которой все фундаментальные взаимодействия, за исключением гравитации, сводятся на достаточно малых масштабах к единому универсальному взаимодействию.

Однако по прошествии нескольких десятков лет у нас по-прежнему нет никаких прямых доказательств того, что эта невероятная экстраполяция является правильной. Последние исследования на суперускорителях типа Теватрона или БАК вроде бы дают косвенные свидетельства в пользу возможности Великого объединения, но тут теоретики обнаружили, что никакого объединения не получится, если мы не дополним существующую Стандартную модель новым феноменом, который получил название *суперсимметрия*.

Суперсимметрия, как следует из названия, представляет собой еще один тип симметрии в мире элементарных частиц. Давно известно, что все элементарные частицы могут быть разделены на два типа, получившие названия *фермионы* и *бозоны*. Фермионы, названные в честь Энрико Ферми, это частицы, квантово-механический момент количества движения которых, называемый *спином*, имеет полуцелое значение (в единицах постоянной Планка): $1/2$, $3/2$ и так далее. Бозоны, получившие название в честь индийского физика Шотендроната Бозе, относятся к частицам, спин которых имеет целое значение: 0, 1, 2...

Поведение фермионов и бозонов радикально различается. Тот факт, что электроны являются фермионами, отвечает, например, за существование химии в том виде, в каком мы ее знаем. Как впервые показал Вольфганг Паули, два фермиона не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии. Из-за этого электроны в атоме вынуждены оставаться на более высоких энергетических уровнях, если более низкие уже заняты другими электронами.

В то же время бозоны не только могут существовать в одном и том же квантовом состоянии, но и стремятся в него попасть, если там уже находятся другие бозоны. Это приводит к образованию таких когерентных состояний, как *бозе-конденсат*. Например, фоновые поля, приводящие к спонтанному нарушению фундаментальных симметрий Вселенной, представляют собой подобные бозе-конденсаты. Недавно при весьма специфических условиях экспериментаторам удалось создать в лаборатории бозе-конденсат, состоящий из сотен или тысяч атомов. В надежде, что эти очень специфические конфигурации могут привести в будущем к созданию новых технологий, авторы первых экспериментов по созданию бозе-конденсата были удостоены Нобелевской премии.

Несмотря на такое разительное отличие между поведением фермионов и бозонов, суперсимметрия ставит в соответствие каждому фермиону суперсимметричного партнера — бозон, а каждому бозону — суперсимметричный фермион. Суперсимметрия предполагает, что суперпартнеры во всем, что не касается величины их спина, должны быть полностью идентичными, то есть иметь одинаковый заряд и массу и так далее. Как можно заметить, ничего подобного в природе не наблюдается. Но вы наверняка уже догадываетесь, каким будет мое объяснение этого феномена. Если суперсимметрия является *нарушенной симметрией*, то суперпартнеры известных нам фермионов и бозонов могут оказаться настолько тяжелыми, что мы попросту пока не в состоянии обнаружить их на существующих ускорителях.

Что может послужить мотивацией для введения новой математической симметрии, которая никак не проявляется в наблюдаемом мире? Так же, как в случае Стандартной модели, введение такой симметрии может разрешить некоторые парадоксы существующей теории. На самом деле последовательное обоснование причин для введения нарушенной суперсимметрии в теорию элементарных частиц слишком сложно, чтобы приводить его здесь; я попытался сделать это в другой недавно вышедшей книге. Одной из главных причин, однако, является то, что эта симметрия может помочь объяснить, почему электрослабое взаимодействие проявляется на гораздо более малых расстояниях, чем гравитационное.

Есть еще один интересный момент. Если предположить, что суперсимметрия действительно существует и нарушается на расстояниях намного меньших, чем характерные расстояния, на которых нарушается симметрия электрослабого взаимодействия, а затем добавить в теорию множество новых тяжелых частиц, которые затем учесть в расчетах силы из-

вестных взаимодействий, то силы всех взаимодействий сравняются на расстояниях приблизительно на шестнадцать порядков меньших, чем размер протона.

Независимо от того, верна эта идея или нет, она больше, чем любая другая, повлияла на умы послевоенных физиков, направив их усилия на поиски новых физических явлений на таких масштабах, которые мы еще долго не сможем изучать в наших лабораториях. Мне трудно объективно оценить, хорошо это или плохо. Тесная связь между теорией и экспериментом, которая в прежние времена направляла развитие физики, сегодня резко ослабла, после того как физики сделали ставку на возможность объединения всех физических взаимодействий, включая гравитацию.

В физике, а конкретно в астрономии, уже на другом конце шкалы расстояний — на космологических масштабах — существует еще одна проблема, бросающая вызов ученым в течение уже почти ста лет. Теория слабого взаимодействия Ферми — не единственная теория, требующая «лечения» при высоких энергиях и на малых расстояниях. Другой такой теорией является общая теория относительности. При попытке соединить теорию гравитации с квантовой механикой возникают многочисленные проблемы. Главной из них является проблема расходимости решения при попытке учесть влияние всех виртуальных частиц, которая становится непреодолимой на расстояниях, примерно на девятнадцать порядков меньших, чем размер протона. Как и теория Ферми, общая теория относительности не представляется теорией, которая в ее нынешнем виде может быть последовательно согласована с квантовой механикой. Возможно, что нам опять потребуется придумывать какую-то новую физику, которая способна изменить поведение теории на таких малых масштабах.

Наиболее популярным кандидатом на роль этой новой физики сегодня является теория струн. На таких расстояниях, где взаимодействие виртуальных частиц становится столь запутанным, что делает невозможным построение квантовой гравитации, теория струн дает нам новый математический аппарат, позволяющий избежать указанных проблем. Более того, гравитация сама естественным образом «возникает» в самом основании теории струн. Единственная загвоздка состоит в том, что струны как квантовые объекты не имеют никакого смысла в четырех измерениях. Для получения последовательной теории пространство, в котором «живут» струны, должно иметь по крайней мере десять, а лучше — одиннадцать измерений, шесть или семь из которых являются скрытыми.

После своих первых успехов теория струн была разрекламирована как Теория всего, или, используя более актуальное для нас определение, как Окончательная физическая теория. Она претендовала на роль действительно фундаментальной теории, применимой на всех уровнях. Новые симметрии должны были положить конец масштабной зависимости теории, которая теперь могла стать действительно полной, то есть не требовать введения новой физики на малых масштабах и естественным образом переходить в классическую физику на больших.

В то время, когда делались все эти оптимистические заявления, многие из нас были настроены скептически, и до настоящего времени этот скептицизм остается оправданным. Сегодня уже ясно, что сами струны не являются кирпичиками нашего мира и должны быть заменены еще более фундаментальными объектами, требующими для своего описания еще большего числа измерений пространства. Кроме того, даже после 30 лет невероятных усилий выдающихся теоре-

тиков прогресс, достигнутый в теории струн, остается, мягко говоря, скромным. Теория струн пока что является скорее надеждой на теорию, чем фактической теорией, и помимо теоретических соображений нет никаких других доказательств, что теория струн вообще имеет что-то общее с реальным миром.

Любая Теория всего, помимо прочего, должна отвечать и на главный вопрос, который очень интересовал Эйнштейна и не меньше интересует меня: возможен ли какой-либо произвол при создании Вселенной? А именно существует ли только один возможный непротиворечивый набор физических законов, такой, что если изменить любой из них, то все мироздание неминуемо рухнет? Надежда получить точный и обоснованный ответ на этот вопрос вдохновляла исследователей на протяжении столетий, и первые успехи теории струн, казалось, свидетельствовали о том, что эта надежда вот-вот воплотится в реальность.

Существует еще одна возможность, и удивительно, как много теоретиков ухватились за нее, когда стало понятно, что теория струн не является *уникальной* теорией. Оказалось, что в зависимости от того, как мы добавляем к нашему пространству дополнительные шесть или семь измерений, можно построить порядка 10^{500} различных непротиворечивых теорий струн, которые будут приводить к описанию такого же множества различных четырехмерных вселенных, в каждой из которых будут действовать свои собственные законы физики. Вместо объяснения, почему Вселенная должна выглядеть именно такой, какой мы ее наблюдаем, теория струн сделала почти противоположное: она показала, что Вселенная может выглядеть как угодно!

В этой ситуации ученые были вынуждены сформулировать принцип, согласно которому наша Вселенная выглядит имен-

но такой только потому, что мы в ней живем! Согласно этому принципу, жизнь возможна только в очень небольшом подмножестве огромного набора возможных вселенных, которые, в свою очередь, могут существовать все одновременно в отдельных областях пространства и времени. В этом случае только вселенные с физиками внутри, способными задавать вопросы об устройстве вселенной, будут похожи на нашу Вселенную. Этот принцип, получивший название *антропного*, наиболее кратко можно сформулировать так: «Мы открываем определенные физические законы, потому что законы, отличные от наших, открывать некому». Может быть, это правда, и в этом случае известные нам законы физики не более чем случайное стечение обстоятельств.

Однако мне не хотелось бы заканчивать эту книгу спекуляциями вокруг Теории всего или Теории ничего. Точно так же можно утверждать, что в поисках универсальной истины мы находимся в универсальном заблуждении. Может быть, по мере бесконечного углубления в дебри строения материи, мы будем обнаруживать все новые и новые физические законы, и конца этому не будет. Важно, что это не имеет никакого значения! Мы узнали, что способны создавать эффективные теории, отделяющие явления, с которыми мы имеем дело, от тех, которые нам еще предстоит обнаружить. Даже если теория струн не окажется Теорией всего, она по-прежнему будет оставаться Теорией чего-то. Даже если она не прояснит загадку темной энергии, ее можно будет использовать, например, для объяснения того, как сферические кони переваривают пищу или почему они имеют именно такие размеры.

Научная истина не требует, чтобы теории, при помощи которых мы ее познаем, были по-настоящему фундаментальными. В этом смысле физика все еще четко руководствуется

принципами, сформулированными 400 лет назад Галилеем, принципами, которым я следовал на протяжении всей книги. Все наши замечательные теории базируются на тех или иных приближениях, которые мы используем совершенно безнаказанно. Выбирая, какой физической величиной можно пренебречь, мы руководствуемся масштабными и размерными соображениями, позволяющими нам определить, что в интересующей нас задаче существенно, а что нет. Все это время мы пытаемся творчески адаптировать то, что уже работает, к новым ситуациям. Поступая таким образом, мы обнаруживаем замечательную скрытую Вселенную, существующую за пределами наших ограниченных человеческих чувств, Вселенную, гораздо более простую и симметричную, чем та, которая дана нам в ощущениях. И всюду, куда мы ни бросим взгляд, нас по-прежнему окружает табун сферических коней.

Благодарности

Эта книга не появилась бы на свет, по крайней мере в ее нынешнем виде, если бы не участие большого количества людей. Все началось с того, что Мартин Кесслер, президент Basic Books, почти двадцать лет назад подловил меня за завтраком на идее написать книгу о том, как физики думают о физике. Через год мы подписали контракт, который предоставлял мне возможность написать еще одну книгу для Basic — на свой выбор. Руководитель проекта, Ричард Либманн-Смит, стал впоследствии моим хорошим другом и, прежде чем он покинул Basic Books, мы много раз обсуждали будущую книгу, что позволило уточнить многие детали изложения.

Книга «Страх физики» в итоге получилась заметно отличающейся от первоначального замысла. Она стала чем-то, что, как я надеялся, захотела бы прочитать моя жена Кейт. Я постоянно тестировал на ней все свои дидактические идеи и не отправлял редактору очередную главу, пока она не получала полное одобрение моей жены. Старший научный редактор Basic Books Сьюзан Рабинер сыграла важную роль в завершении работы над первым изданием. Она убедила меня, что мой новый взгляд на популяризацию науки весьма перспективен и, что более важно, Basic Books готово продавать по-

добные книги. После того как я подготовил первую главу, Сьюзан с головой ушла в наш проект. Ее энтузиазм постоянно подстегивал меня в работе над книгой. В результате я смог совершить невероятное для самого себя — сдать рукопись в срок.

В ходе работы над книгой я имел возможность обсуждать различные идеи с разными людьми. Как я уже сказал, моя жена исполняла роль первого фильтра на пути рукописи к читателю. Я также хотел бы поблагодарить многочисленных студентов, которым я многие годы читал курс «физики для не-ученых». Они помогли мне улучшить формулировки, сделав какие-то части изложения более понятными. Боюсь, что я приобрел от этого сотрудничества больше, чем они. Я также отправил мою работу в научный центр Онтарио с просьбой оценить, что из изложенного могло бы только показаться непонятным нефизикам, а что на самом деле будет непонятным — зачастую это две разные вещи. Наконец, как непосредственно, так и косвенно на мою работу повлияли мои учителя, а позднее — мои коллеги и соавторы. В этом списке слишком много людей, чтобы перечислять их поименно. Те, о ком я говорю, знают это, и я благодарю их. Я надеюсь, что любой, читающий эту книгу, сразу поймет, какую важную роль в становлении моего физического мышления сыграл Ричард Фейнман, впрочем, в этом отношении я не одинок. Я также хочу поблагодарить Субира Сашдева за полезные обсуждения, которые помогли мне при написании раздела о фазовых переходах, Мартина Уайта и Джулеса Колемана за чтение рукописи и ценные комментарии и Жатиллу ван дер Веен-Дэвис и Дженнифер Элизабет Марш за использование книги при чтении вступительного курса физики в Университете Калифорнии и замеченные ошибки.