

числось так, как если бы нашим предкам в конце XIX столетия преподнесли современный суперкомпьютер, но не дали руководства по его эксплуатации. Используя метод проб и ошибок, можно было бы оценить мощь суперкомпьютера, но для того, чтобы достичь подлинного мастерства, потребовались бы энергичные и продолжительные усилия. Признаки мощи компьютера, как проблемки способности теории струн давать объяснения, могут быть причиной очень сильной мотивации к овладению всем устройством. Подобная мотивация сегодня подстегивает поколение физиков-теоретиков в стремлении добиться полного и точного аналитического понимания теории струн.

Замечание Витена и схожие высказывания других специалистов в этой области указывают на то, что могут пройти десятилетия или даже столетия, прежде чем теория струн будет полностью разработана и осознана. Это вполне может оказаться правдой. В действительности математический аппарат теории струн столь сложен, что сегодня никто даже не знает точных уравнений этой теории. Вместо этого физики используют лишь приближенные варианты этих уравнений, и даже эти приближенные уравнения столь сложны, что пока подпадают только частичному решению. Тем не менее, вдохновляющие прорывы конца 1990-х гг., которые позволили дать теоретические ответы на вопросы невиданной доселе трудности, могут быть признаком того, что полное понимание теории струн на количественном уровне гораздо ближе, чем считалось первоначально. По всему миру физики разрабатывают новые мощные методы, далеко превосходящие использовавшиеся до сих пор многочисленные приближенные методы, коллективно собирая вместе разрозненные элементы головоломки теории струн с обнадёживающей скоростью.

Удивительно, но эти разработки дают новые средства для пересмотра некоторых основных положений теории, которые считались установленными. Например, при взгляде на рис. 1.1 у вас может возникнуть законный вопрос: А почему струны? Почему не маленькие диски? Или микроскопические каплевидные ядрышки? Или какая-ни-

будь комбинация этих тел? Как мы увидим в главе 12, последние достижения показали, что перечисленные компоненты играют важную роль в теории струн, и что теория струн на самом деле является частью еще более грандиозного синтеза, который в настоящее время имеет (несколько мистическое) название M-теории. Эти последние достижения будут рассмотрены в заключительных главах данной книги.

Прогресс в науке осуществляется скачками. Одни периоды наполнены великими прорывами, в другие времена исследователи остаются без улова. Ученые получают новые теоретические и экспериментальные результаты. Они обсуждаются научным сообществом, иногда отвергаются, иногда модифицируются, а иногда служат отправной точкой для скачков в разработке новых и более точных методов понимания физического мира. Иными словами, наука движется в направлении того, что, как мы надеемся, будет окончательной истиной, по *zigzag* образному пути, который начался с самых первых попыток человечества познать мироздание, и конец которого мы не можем предсказать. Нам неизвестно, является ли теория струн промежуточной остановкой на этом пути, или важным поворотным пунктом, или конечным пунктом назначения. Однако исследование, проводившееся в течение последних двадцати лет сотнями физиков и математиков из многих стран, дали нам обоснованную надежду, что мы на правильном пути и, возможно, вышли на финишную прямую.

Эта книга представляет собой рассказ о теории струн, которая столь богата и ведет к таким далеко идущим выводам, что даже наш современный уровень понимания позволил получить поразительно новые результаты, касающиеся устройства нашей Вселенной. Основной темой в дальнейшем изложении будут те достижения, которые движут революцию в понимании пространства и времени, начатую специальной и общей теорией относительности Эйнштейна. Мы увидим, что если теория струн верна, строение нашей Вселенной имеет такие свойства, которые, наверно, изумили бы даже Эйнштейна.

Часть II

ДИЛЕММА ПРОСТРАНСТВА, ВРЕМЕНИ И КВАНТОВ

Глава 2

Пространство, время и взгляд наблюдателя

В июне 1905 г. двадцатипятилетний Альберт Эйнштейн послал в немецкий журнал *Annalen der Physik* статью, в которой бросил вызов парадоксу о скорости света, который привлек его внимание десять лет назад, когда он был еще подростком. Перевесть последнюю страницу рукописи Эйнштейна, редактор журнала, Макс Планк, понял, что общепринятые научные представления низвергнуты. Без шума и фанфар скромный чиновник патентного бюро из швейцарского города Берна радикально изменил традиционные представления о пространстве и времени, заменив их новыми понятиями, бросившими вызов всему, к чему мы привыкли на основе нашего жизненного опыта.

Парадокс, который беспокоил Эйнштейна в течение десяти лет, состоял в следующем. В середине XIX в., после тщательного изучения результатов экспериментальных работ английского физика Майкла Фарадея, шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл сумел объединить понятия электричества и магнетизма в единую теорию *электромагнитного поля*. Если вам когда-либо приходилось находиться на вершине горы перед началом сильной грозы или стоять рядом с генератором Ван де Граафа, вы

почувствовали, что такое электромагнитное поле, потому что вы его ощутили физически. Для тех, кто не имеет такого опыта, скажем, что поле похоже на поток электрических и магнитных силовых линий, пронизывающих область пространства. Например, если рассыпать железные опилки возле магнита, то можно увидеть, что они образуют упорядоченный рисунок, следующий невидимым силовым линиям магнитного поля. Сняв шерстяной свитер в особенно сухой день, вы слышите потрескивание, сопровождающееся одним-двумя короткими разрядами, что свидетельствует о существовании силовых линий электрического поля, порождаемых стекающим с волокон вашего свитера электрическим зарядом. Помимо объединения этих и всех других электрических и магнитных явлений в рамках единого математического описания, теория Максвелла довольно неожиданно привела к выводу, что электромагнитные возмущения распространяются с постоянной, никогда не изменяющейся скоростью, равной скорости света. На основании этого факта Максвелл заключил, что видимый свет представляет собой не что иное, как определенный тип электромагнитной волны. Как нам сегодня известно, взаимодействуя с химическими со-

единениями в сетчатке глаза, эта волна дает человеку зрение. Более того (и это ключевой момент), теория Максвелла также показала, что все электромагнитные волны, в том числе и видимый свет, являются своего рода вечными странниками. Они никогда не останавливаются. Они никогда не замедляют своего движения. Свет *всегда* движется со скоростью света.

Все это хорошо и замечательно до тех пор, пока мы, всед за шестнадцатилетним Эйнштейном, не зададимся вопросом: что произойдет, если пуститься в погоню за светом, двингясь при этом со скоростью света? Интуиция, основанная на законах движения Ньютона, подсказывает, что мы догоним световые волны, и они будут казаться нам неподвижными, свет как бы остановится. Но согласно теории Максвелла и не вызывающим сомнений экспериментальным данным, такого явления, как неподвижный свет, попросту не существует — никому и никогда не удавалось держать на своей ладони неподвижный луч света. Отсюда и возникает парадокс. К счастью, Эйнштейн не знал о том, что многие ведущие физики мира сражались с этой задачей (часто следуя пути, ведущему в тупик), и обдумывая парадокс Максвелла и Ньютона без помех в уединении со своими собственными мыслями.

В этой главе мы расскажем, как Эйнштейн разрешил это противоречие в своей специальной теории относительности, навсегда изменив наши представления о пространстве и времени. Может показаться странным, что ключевым моментом в специальной теории относительности является точное понимание того, как выглядит мир для людей, часто называемых «наблюдателями», которые движутся по отношению друг к другу. На первый взгляд это может показаться просто скалистическим упражнением. Но оказалось, что это вовсе не так: благодаря Эйнштейну путешествие с воображаемыми наблюдателями, двигающимися за световым лучом, приводит к глубоким выводам, позволяющим понять, как необычно могут выглядеть самые заурядные ситуации для людей, находящихся в относительном движении.

Интуиция и ее изъяны

Повседневный опыт может подсказать несколько примеров, в которых восприятие ситуации такими наблюдателями различно. Например, деревья, растущие вдоль шоссе, будут выглядеть движущимися для водителя едущего автомобиля и неподвижными для путника, присевшего на обочине. Аналогично, приборная панель автомобиля не кажется движущейся для водителя (по крайней мере, мы надеемся на это), но, как и все другие части автомобиля, движется с точки зрения путника. Это настолько фундаментальные и интуитивно осязаемые свойства окружающего нас мира, что мы редко обращаем на них внимание.

Специальная теория относительности утверждает, однако, что различия в картине, видимой двумя такими наблюдателями, являются более тонкими и глубокими. В ней высказываются странное утверждение, что наблюдатели, находящиеся в относительном движении, будут по-разному воспринимать расстояние и время. Это означает, как мы увидим ниже, что одинаковые наручные часы у двух наблюдателей, перемещающихся друг относительно друга, будут идти с *разной скоростью* и покажут разную длительность промежутка времени между двумя выбранными событиями. Специальная теория относительности показывает, что это утверждение не связано с точностью часов, а представляет собой неотъемлемое свойство самого времени.

Аналогично, если движущиеся по отношению друг к другу наблюдатели будут проводить измерения расстояния с помощью совершенно одинаковых рулеток, они получат разные значения длины. И снова дело здесь не в погрешностях средств измерения и не в ошибках при их использовании. Самые точные в мире измерительные устройства подтвердят, что пространство и время, измераемые как расстояния и промежутки времени, воспринимаются разными наблюдателями по-разному. Специальная теория относительности в окончательной формулировке Эйнштейна разрешает противоречие между нашими интуитивными представлениями о движении и свойствами света. Од-

нако это решение имеет свою цену — движущиеся относительно друг друга наблюдатели будут по-разному воспринимать пространство и время.

С тех пор, как Эйнштейн сообщил миру о своем поразительном открытии, прошло почти сто лет, однако до сих пор большинство из нас воспринимает пространство и время как абсолютные понятия. Мы не имеем интуитивного знания понятий специальной теории относительности, мы не чувствуем ее. Следствия специальной теории относительности не являются частью нашей интуиции. Причина этого весьма проста: эффекты, обусловленные специальной теорией относительности, зависят от скорости движения. При скоростях, с которыми движутся автомобили, самолеты и даже космические челноки, эти эффекты необычайно малы. Различия в восприятии пространства и времени между неподвижными наблюдателями и наблюдателями, едущими в машинах или летящими в самолетах, *безусловно*, существуют, но они столь малы, что остаются незамеченными. Однако если бы мы путешествовали в космическом корабле будущего, скорость которого составляет значительную часть скорости света, то эффекты, предсказываемые теорией относительности, были бы совершенно очевидны. Но, конечно, такая возможность пока еще остается в области фантастики. Тем не менее, как мы увидим в последующих разделах, правильно поставленные эксперименты позволяют ясно и точно наблюдать релятивистские свойства пространства и времени, предсказываемые теорией Эйнштейна.

Для того чтобы получить представление о величине рассматриваемых эффектов, представим, что на дворе 1970 г., и в моде большие и быстрые автомобили. Слим, только что потративший все свои сбережения на приобретение нового «Понтиака», отправился вместе со своим братом Джимом на местный гоночный трек, чтобы устроить своей новой машине такой тест-драйв, который ему не позволил продать. Разогрев машину, Слим устремился по гоночной полосе длиной в один километр со скоростью 200 км/ч; а Джим остался стоять на обочине, засекая время. Желая получить независимое

подтверждение, Слим тоже пользуется секундомером, чтобы определить время, за которое машина пройдет полосу. До появления работы Эйнштейна никто не усомнился бы в том, что если секундомеры Слима и Джима работают правильно, они покажут одинаковое время. Однако согласно специальной теории относительности, секундомер Джима покажет 18 с, а секундомер Слима — 17,999999999999999 с — *на крошечную долю секунды меньше*. Конечно, эта разница настолько мала, что она может быть обнаружена только при измерениях, точность которых во много раз превосходит точность ручных секундомеров, которые запускаются и останавливаются нажатием пальца, точность систем хронометража, используемых на олимпийских играх, и даже точность прецизионных атомных часов самой современной конструкции. Поэтому неудивительно, что наш повседневный опыт не обнаруживает того, что течение времени зависит от того, с какой скоростью мы движемся.

Пожокие различия обнаружатся и при измерениях длины. Допустим, что в ходе следующего испытания Джим решил использовать хитрый трюк для измерения длины новой машины Слима: он запускает секундомер, когда мимо него проходит передняя часть автомобиля, и останавливает его, как только рядом с ним оказывается задняя часть машины. Поскольку Джим знает, что автомобиль Слима движется со скоростью 200 км/ч, он может рассчитать его длину, умножив скорость на время, зафиксированное его секундомером. И вновь, до появления теории Эйнштейна, ни у кого не возникли бы сомнения, что длина, которую таким косвенным способом определил Джим, *в точности* совпадет с длиной, которую тщательно измерил Слим, когда его машина стояла без движения на полу автомобильного салона. Специальная теория относительности, напротив, утверждает, что если Слим и Джим выполнили измерения точно, и Слим установил, что длина его машины составляет, скажем, ровно 5 м, то измерения Джима дадут цифру 4,9999999999999914 м — *на крошечную долю метра меньше*. Как и в случае измерения времени, это различие настолько

мало, что обычные инструменты не в состоянии обнаружить его.

Хотя эти различия чрезвычайно малы, они указывают на фатальный изъян в общепринятой концепции универсального и неизменного пространства и времени. По мере того как относительная скорость наблюдателей, таких как Слим и Джим, увеличивается, этот изъян становится все более очевидным. Чтобы различия стали заметными, скорость движения должна составлять существенную долю от максимально возможной скорости — скорости света, которая, согласно теории Максвелла и результатам экспериментальных измерений, составляет примерно 300 000 км/с или около 1,08 млрд км/ч. Такой скорости достаточно, чтобы обогнуть земной шар более семи раз в течение одной секунды. Например, если Слим будет двигаться со скоростью не 200 км/ч, а 935 млн км/ч (около 87 % от скорости света), то, как показывают расчеты с использованием математического аппарата специальной теории относительности, длина его машины, измеренная Джимом, составит примерно 2,5 м. Это существенно отличается от результата, полученного Слимом (а также от цифры, приведенной в техническом руководстве к автомобилю). Аналогично, время, за которое автомобиль пройдет гоночную полосу по данным Джима, будет примерно в два раза больше, чем время, измеренное Слимом.

Поскольку такие огромные скорости находятся далеко за пределами технически достижимых, эффекты «замедления времени» и «лоренцевского сокращения», как они называются в специальной литературе, в нашей повседневной жизни чрезвычайно малы. Если бы мы жили в мире, в котором тела обычно движутся со скоростями, близкими к скорости света, эти свойства пространства и времени были бы настолько постоянны нам интуитивно (поскольку мы сталкивались бы с ними постоянно), что забывали бы об отдельном упоминании их, как рассмотренное в начале этой главы кажущееся движение деревьев на обочине дороги. Но поскольку мы живем в мире, где эти особенности нам непривычны. Как будет видно ниже, понимание и принятие их тре-

бует, чтобы мы подвергли наш взгляд на мир значительным изменениям.

Принцип относительности

В основе специальной теории относительности лежат два простых свойства, имеющих, однако, глубокие корни. Одно из них, как уже упоминалось, касается света; мы будем обсуждать его более подробно в следующем разделе. Другое является более абстрактным. Оно связано не с каким-либо конкретным физическим законом, а относится ко всем законам физики. Это *принцип относительности*, который базируется на простом факте: всегда, когда речь идет об абсолютной величине или о векторе скорости (величине скорости тела и направлении движения тела), следует точно указать, кто или что выполняет измерения. Важность этого утверждения легко понять на примере следующей ситуации.

Представим себе, что Джордж, одетый в космический скафандр с прикрепленной к нему красной сигнальной лампочкой, парит в абсолютной темноте абсолютно пустого космического пространства, вдали от всех планет, звезд и галактик. С точки зрения Джорджа, он находится в полной неподвижности, в однородном безмолвном мраке Вселенной. Вдалеке Джордж замечает слабенький мерцающий зеленый огонек, который постепенно приближается к нему. В конце концов он приближается так близко, что Джордж видит лампочку, прикрепленную к скафандру другого космонавта, Грейса, которая медленно проплывает мимо него. Пролетая мимо, она машет ему рукой. Джордж отвечает тем же, и она медленно удаляется. С той же достоверностью история могла быть рассказана и Грейсом. Начало рассказа будет таким же: Грейс в полном одиночестве, в необъятном безмолвном пространстве. Вдали Грейс замечает мерцающий красный огонек, который постепенно приближается к ней. Наконец огонек подходит достаточно близко, чтобы Грейс мог увидеть, что это лампочка, прикрепленная к скафандру другого космонавта, Джорджа. Он медленно проплывает мимо и, поравнявшись с ней, машет ей рукой. Грейс отвечает, и он растворяется во мраке.

Эти две истории описывают одну и ту же ситуацию с двух различных, но равноправных точек зрения. Каждый наблюдатель считал себя неподвижным и воспринимал другого как движущегося. Обе эти точки зрения понятны и оправданы. Поскольку между двумя космонавтами существует симметрия, с фундаментальных позиций нет оснований утверждать, что один из них «прав», а другой «неправ». У каждого одинаковые основания считать себя правым.

Этот пример демонстрирует ясность принципа относительности, которая состоит в том, что понятие движения относительно. Мы можем говорить о движении тела только по отношению к какому-то другому телу. Таким образом, утверждение «Джордж движется со скоростью 10 км/ч» не будет иметь смысла до тех пор, пока мы не укажем тело для сравнения. Утверждение «Джордж движется со скоростью 10 км/ч относительно Грейса» имеет смысл, поскольку теперь мы указали Грейса в качестве точки отсчета. Как показывает наш пример, это последнее утверждение эквивалентно утверждению «Грейс движется со скоростью 10 км/ч относительно Джорджа (в противоположном направлении)». Другими словами, не существует понятия «абсолютного» движения. Движение относительно.

Ключевым моментом в этой истории является то, что ни Джорджа, ни Грейса не толкали, не тянули, не прилагали к ним сил и не оказывали на них какого-либо другого воздействия, которое могло бы нарушить безмятежное состояние свободного равномерного движения, в котором они пребывают. Таким образом, более точная формулировка говорит, что *свободное* движение имеет смысл только относительно других объектов. Это важное уточнение, поскольку если действуют силы, они могут изменить скорость наблюдателей — величину скорости и/или направления движения, и эти изменения могут быть зафиксированы. Например, если бы за спиной Джорджа был реактивный ранцевый двигатель, Джордж наверняка бы почувствовал, что он движется. Это чувство является внутренним. Если бы ранцевый двигатель работал, Джордж бы знал, что он движется, даже если бы его глаз-

были закрыты, и он не мог проводить сравнения с другими объектами. Даже без этих сравнений он не мог бы уже утверждать, что был неподвижен, а «остальной мир двигался мимо него». Движение с постоянной скоростью относительно, а движение с непостоянной скоростью, или, иными словами, с *ускорением* — нет. (Мы вернемся к этому вопросу в следующей главе, когда будем обсуждать ускорение и общую теорию относительности Эйнштейна.)

Помещение этих событий во мрак пустого космического пространства облегчает понимание за счет отсутствия таких привычных объектов, как улицы и здания, которым мы обычно, хотя и не совсем оправданно, присваиваем статус «неподвижных». Однако тот же принцип применим и к земным условиям: с ним приходится сталкиваться и в повседневной жизни¹⁾. Представим, например, что уснув в поезде, вы проснулись как раз в тот момент, когда мимо по параллельному пути проходит другой поезд. Вид из окна полностью закрыт этим поездом, который не дает вам видеть другие объекты, и в течение какого-то времени вы не будете знать, кто движется — ваш поезд, другой или оба сразу. Конечно, если ваш поезд качивается или постукивает на стыках рельсов, или если он меняет направление движения на повороте пути, вы почувствуете, что движетесь. Но если движение будет плавным, если скорость поезда будет оставаться постоянной, вы будете наблюдать только относительное движение двух поездов, и не сможете утверждать наверняка, который из них движется.

Сделаем еще один шаг. Представим, что вы сидите в таком поезде, и опустили шторы, так что окна теперь полностью закрыты. При отсутствии возможности видеть что-либо за пределами купе и при абсолютно постоянной скорости движения поезда у вас не будет никакой возможности определить, движетесь вы или нет. Купе вокруг вас выглядит совершенно одинаково независимо от того, стоит ли поезд или мчится с большой скоростью. Эйнштейн формализовал эту идею, которая на самом деле восходит еще к Галилею, провозгласив, что ни вы, и никакая другая путешественник, не сможете провести в закрытом купе эксперимент, который позво-

лил бы определить, движется поезд или нет. Здесь опять работает принцип относительности, поскольку любое свободное движение относительно, оно приобретает смысл только при сравнении с другими объектами или наблюдателями, которые также совершают свободное движение. У вас нет возможности определить состояние вашего движения без прямого или косвенного сравнения с каким-либо «внешним» телом. Понятия «абсолютного» равномерного движения попросту не существует, такое движение приобретает физический смысл только при сравнении.

В действительности Эйнштейн понял, что принцип относительности означает большее: законы физики, каковы бы они ни были, должны быть абсолютно одинаковы для всех наблюдателей, совершающих равномерное движение. Если бы Джордж и Грей не просто парили в одиночестве в пространстве, а проводили бы одинаковые серии экспериментов на своих космических станциях, результаты, полученные ими, были бы одинаковы. Напомним еще раз, что каждый из них абсолютно убежден, что его или ее станция находится в покое, хотя станции и совершают относительное движение. Если все используемое ими оборудование одинаково, и нет никаких различий в условиях экспериментов, они будут в полностью симметричных условиях. Аналогично, законы физики, которые каждый из них будет выводить из результатов экспериментов, также будут идентичны. Ни сами наблюдатели, ни проводимые ими эксперименты не будут подвержены никакому влиянию, т. е. никоим образом не будут зависеть от равномерного движения. Именно эта простая концепция устанавливает полную симметрию между такими наблюдателями и составляет содержание принципа относительности. Вскоре мы используем всю мощь этого принципа.

Скорость света

Второй ключевой компонент специальной теории относительности связан со светом и свойствами его распространения. Только что мы говорили, что утверждение «Джордж движется со скоростью 10 км/ч» не имеет

смысла без указания ориентира для сравнения. Однако в результате почти столетних усилий ряда выдающихся физиков-экспериментаторов было показано: все наблюдатели соглашались с тем, что свет движется со скоростью 300 000 км/с, независимо от ориентира для отсчета.

Этот факт потребовал революционных изменений наших взглядов на Вселенную. Попробуем сначала понять его смысл, ставшая со сходными утверждениями применительно к более обычным объектам. Представим, что стоит прекрасный солнечный денек, и вы вышли на улицу поиграть в мяч с подругой. В течение какого-то времени вы оба лениво бросали мяч друг другу со скоростью, скажем, 6 м/с. Вдруг налетает неожиданная гроза, и вы оба бежите от нее в поисках укрытия. После того, как гроза прошла, вы решаете вернуться к игре в мяч, но вдруг замечаете, что что-то изменилось. Волосы вашей подружки встали дыбом и торчат в разные стороны, глаза округлились и стали безумными. Взглянув на ее руку, вы со страхом видите, что она больше не хочет играть в мяч, а вместо этого собирается запустить в вас ручную гранату. Понятно, что ваш энтузиазм по поводу игры в мяч резко идет на убыль, вы поворачиваетесь и бежите. Когда ваша партнерша бросает гранату, она летит в вашу сторону, но поскольку вы бежите, скорость, с которой она приближается к вам, будет меньше 6 м/с. Исходя из повседневного опыта, можно утверждать, что вы можете бежать со скоростью, скажем, 3,6 м/с, и тогда ручная граната будет приближаться к вам со скоростью $6 - 3,6 = 2,4$ м/с. Еще один пример. Если вы находитесь в горах, и на вас с грохотом мчится снежная лавина, вы стремитесь повернуться и броситься бежать, поскольку это уменьшит скорость, с которой снег приближается к вам, и даст хоть какую-то надежду на спасение. Как и раньше, для неподвижного наблюдателя скорость приближения лавины будет больше, чем с точки зрения наблюдателя, спасающегося бегством.

Ну а теперь сравним все наши наивные наблюдения за мячами, гранатами и снежными лавинами с фактами, относящимися к свету. Чтобы облегчить сравнение, будем

рассматривать луч света как совокупность крошечных «сгустков» или «комочков», известных под названием фотонов (более подробно свойства света будут обсуждаться в главе 4). Когда мы включаем сигнальные огни или испускаем лазерный луч, мы, на самом деле, выстреливаем пучок фотонов в ту сторону, в которую направлено устройство. Как и в случае с гранатами и лавинами, давайте рассмотрим, как движение фотона выглядит для наблюдателя, который находится в движении. Предположим, что ваша потерявшая рассудок подруга вместо гранаты взяла в руки мощный лазер. Если она стреляет из лазера в вашу сторону, а у вас есть под рукой подходящее измерительное устройство, вы можете обнаружить, что скорость приближения фотонов пучка составляет 300 000 км/с. А что произойдет, если вы станете убегать, как вы поступили, столкнувшись с перспективой поиграть с ручной гранатой? Какое значение скорости вы получите для приближающихся фотонов? Для большей внушительности, предположим, что в вашем распоряжении звездный корабль «Энтерпрайз», и вы удираете от своей подружки со скоростью, скажем, 50 000 км/с. Следуя логике традиционного ньютоновского подхода, поскольку вы убегаете, измеренная вами скорость приближающихся фотонов окажется меньше. Соответственно, вы можете рассчитывать, что они приближаются к вам со скоростью, равной $300\,000 - 50\,000 \text{ км} = 250\,000 \text{ км/с}$.

Растущее количество различных экспериментальных данных, первые из которых относятся еще к 1880-м гг., а также тщательный анализ и интерпретация максвелловской электромагнитной теории света, постепенно убедили научное сообщество, что на самом деле вы получите другой результат. Даже несмотря на то, что вы убегаете, результат вашего измерения скорости приближающихся фотонов все равно составит 300 000 км/с и ни на йоту меньше. На первый взгляд это выглядит очень забавно и совершенно не согласуется с тем, что происходило, когда вы убегали от приближающегося мяча, гранаты или лавины, однако скорость приближающихся фотонов всегда будет составлять 300 000 км/с. Двигаетесь ли вы на

встречу приближающимся фотонам или просто удаляющийся, не имеет значения: скорость их приближения или удаления будет оставаться совершенно неизменной, и вы всегда получите значение 300 000 км/с. Независимо от относительного движения между источником фотонов и наблюдателем, скорость света всегда будет одной и той же¹⁾.

Технологические ограничения таковы, что описанные выше «эксперименты» со светом не могут быть проведены. Однако были проведены другие, сопоставимые эксперименты. Например, в 1913 г. голландский физик Виллем де Ситтер предположил, что для измерения влияния движения источника на скорость света могут использоваться движущиеся с большой скоростью двойные звезды (две звезды, которые вращаются одна вокруг другой). Результаты многочисленных экспериментов такого рода, выполненных за последние восемьдесят лет, продемонстрировали, с впечатляющей точностью, что скорость света от движущейся звезды равна скорости света, испускаемого неподвижной звездой, т. е. 300 000 км/с. Более того, в течение прошлого столетия было проведено большое число других, весьма тщательных экспериментов, в ходе которых скорость света измерялась прямо и косвенно в самых разных условиях. Были проверены также различные следствия постоянства скорости света, и все эти данные подтвердили неизменность скорости света.

Если вам покажется, что это свойство света трудно усвоить, вы можете утешиться тем, что вы не одиноки. В начале XX в. физики потратили немало усилий на то, чтобы опровергнуть его. Они не смогли этого сделать. Эйнштейн, напротив, приветствовал постоянство скорости света, поскольку оно позволяло разрешить противоречие, которое беспокоило его с тех пор, когда он был подростком: независимо от того, с какой скоростью вы движетесь за лучом света, он по-прежнему будет удаляться от вас со скоростью света. Вы не можете сделать восприимчивую скорость, с которой движется свет, ни на йоту меньше чем 300 000 км/с, не говоря уж о том, чтобы свет казался покоящимся. Вердикт окончательный, обжалованию не подлежит. Но триумфальное разрешение

парадокса скорости света было не просто маленькой победой. Эйнштейн понял, что постоянство скорости света означает ниспровержение всей ньютоновской физики.

Истина и ее последствия

Скорость является мерой того, на какое расстояние может переместиться объект в течение заданного промежутка времени. Если мы едем в автомобиле, двигающемся со скоростью 100 км/ч, это означает, конечно, что мы проедем 100 км, если сможем поддерживать эту скорость в течение часа. В такой формулировке скорость выглядит довольно тривиальным понятием, и вы можете удивиться, зачем поднимать столько шума по поводу скорости мячей, снежных лавин и фотонов. Однако, обратив внимание на то, что *расстояние* представляет собой характеристику пространства; в частности, оно представляет собой меру того, сколько пространства расположено между двумя точками. Заметим также, что *длительность* представляет собой характеристику времени, а именно, промежутка времени между двумя событиями. Следовательно, скорость связывает понятия пространства и времени. Рассуждая таким образом, мы видим, что любой факт, который бросает вызов обычным представлениям о скорости, например, постоянство скорости света, может привести к пересмотру общих представлений о пространстве и времени. Именно поэтому странный факт, касающийся скорости света, заслуживает тщательного исследования. Внимательное изучение привело Эйнштейна к удивительным выводам.

Влияние на время. Часть I

Используя постоянство скорости света, можно с минимальными усилиями показать, что привычная обывденная концепция времени неверна. Представим себе лидеров двух воюющих держав, сидящих на противоположных концах длинного стола переговоров, которые только что пришли к согласию о прекращении огня, но ни один из них не хочет подписывать это соглашение раньше другого. Генеральный секретарь ООН находил

лучшее решение. Ровно посередине между двумя президентами помещается электрическая лампа, которая сначала выключена. Когда лампа выключается, свет, который она излучает, достигает каждого из президентов одновременно, поскольку они находятся на одинаковом расстоянии от лампы. Каждый из президентов согласен подписать свою копию договора, когда он (или она) увидит свет. Это план претворяется в жизнь, и соглашение подписывается к взаимному удовлетворению обеих сторон.

Вдохновленный успехом, Генеральный секретарь использует тот же самый подход к двум другим воюющим нациям, которые также достигли мирного соглашения. Единственное различие состоит в том, что эти президенты ведут переговоры, сидя на противоположных концах стола, который находится в вагоне поезда, движущегося с постоянной скоростью. Конкретно, лицо президента Форляндии обращено в сторону движения поезда, а лицо президента Бэкляндии — в обратную сторону. Знакомый с тем, что законы физики остаются неизменными и не зависят от состояния движения до тех пор, пока движение остается равномерным, генеральный секретарь игнорирует это различие и проводит церемонию подписания по сигналу электрической лампы точно так же, как и в предыдущем случае. Оба президента подписывают соглашение и празднуют конец войны в кругу своих советников.

Как раз в этот момент приходит известие, что между представителями обеих стран, наблюдавших за церемонией с платформы, мимо которой проходил поезд, опять начался столкновения. Пассажиры поезда, в котором проходили переговоры, потрясенны, услышав, что причина вновь вспыхнувшей вражды, по словам жителей Форляндии, состоит в том, что их одурачили: их президент подписал договор *раньше* президента Бэкляндии. Но если все, что присутствовал в поезде, были единодушно в том, что договор был подписан одновременно, как могло случиться, что наблюдатели, расположенные снаружи, видели это иначе?

Давайте рассмотрим более подробно, как все это выглядело с точки зрения наблюдателя, расположенного на платформе. Сначала

лампа в поезде выключена, затем в какой-то момент времени она включается, посылая лучи света в сторону обоих президентов. С точки зрения наблюдателя на платформе президент Форляндии движется навстречу свету, а президент Бэкляндии — удаляется от света. Это значит, что для наблюдателя на платформе свет должен пройти меньший путь, чтобы достичь президента Форляндии, который движется в сторону приближающегося света, чем до президента Бэкляндии, который удаляется от света. Это высказывание не касается *скорости* света, распространяющегося в сторону двух президентов — мы уже отмечали, что независимо от состояния движения источника и наблюдателя, скорость света всегда остается одной и той же. Мы говорим только о том, *какое расстояние*, с точки зрения наблюдателя на платформе, должен пройти свет от вспышки лампы, прежде чем он достигнет каждого из президентов. Поскольку для президента Форляндии это расстояние меньше, чем для президента Бэкляндии, а скорость света одна и та же при движении в обоих направлениях, свет достигнет президента Форляндии раньше. Вот почему граждане Форляндии сочли себя обманутыми.

Слушая рассказы свидетелей, которые передает служба новостей CNN, Генеральный секретарь, оба президента и все их советники не могут поверить своим ушам. Они все согласны в том, что лампа была надежно закреплена ровно посередине расстояния между двумя президентами и, следовательно, свет, который излучала лампа, прошел *одинаковое* расстояние до каждого из президентов. Поскольку скорость света, излученного вправо и влево, одинакова, они считают, и сами наблюдали это, что свет достиг каждого из президентов одновременно.

Кто же прав, те, кто ехал в поезде, или те, кто стоял на платформе? Наблюдения каждой группы и их аргументы безупречны. Правы *и те, и другие*. Как и в случае с двумя обитателями космического пространства, Джордж и Грейс, каждая точка зрения одинаково истинна. Только вот эти две истины противоречат друг другу. Между тем на кону важный политический вопрос: действительно ли оба президента подписали согла-

шение одновременно? Наблюдения и аргументы, изложенные выше, с неизбежностью ведут нас к выводу, что *с точки зрения тех, кто находился в поезде, договор был подписан одновременно, а с точки зрения тех, кто стоял на платформе — не одновременно*. Иными словами, события, которые являются одновременными с точки зрения одних наблюдателей, могут быть неодновременными с точки зрения других, если эти две группы наблюдателей движутся по отношению друг к другу.

Это удивительный вывод. Он представляет собой один из самых глубоких прозрений философии в сущность нашего мира, когда-либо сделанных человеком. Если спустя долгое время после того, как вы закончите читать эту книгу, из всей этой главы вы сможете вспомнить только несчастливую попытку разрядки международных отношений, это будет означать, что вы уловили суть открытия Эйнштейна. Это совершенно неожиданное свойство времени было установлено без использования математического аппарата, доступного лишь избранным, без запутанных цепочек логических выводов — только на основе факта постоянства скорости света. Заметьте, что если бы скорость света не была постоянной, а вела себя в соответствии с нашими интуитивными представлениями, основанными на медленном движении мячей и снежков, стоявшие на платформе наблюдатели согласились бы с теми, кто был в поезде. Наблюдатель с платформы продолжал бы считать, что фотоны должны пройти большее расстояние до президента Бэкляндии, чем до президента Форляндии. Однако обычная интуиция подсказывает, что в сторону президента Бэкляндии свет будет двигаться быстрее, получив дополнительный «толчок» от поезда, движущегося вперед. Аналогичным образом, эти наблюдатели могли полагать, что свет, приближающийся к президенту Бэкляндии, будет двигаться медленнее, поскольку он увлечется назад движением поезда. Если учесть эти (ошибочные) доводы, наблюдатели на платформе увидели бы, что лучи света достигают каждого президента одновременно. Однако в реальном мире свет не увлечивается и не уменьшает своей скорости, его нельзя

подтолкнуть или затормозить. Следовательно, наблюдатели на платформе будут правы, утверждая, что сначала свет дошел до президента Форляндии.

Постоянство скорости света требует, чтобы мы отказались от устаревшего представления о том, что одновременность является универсальным понятием, которое воспринимается всеми одинаково, независимо от состояния движения. Не существует универсальных часов, которые, как считалось раньше, беспристрастно отсчитывают одинаковые секунды здесь, на Земле, на Марсе, на Юпитере, в туманности Андромеды и в любом другом закоулке Вселенной. Напротив, наблюдатели, движущиеся относительно друг друга, будут иметь различное мнение по вопросу об одновременности событий. Как говорилось выше, эта неотъемлемая характеристика мира, в котором мы живем, является столь непривычной потому, что связанные с ней эффекты чрезвычайно малы при скоростях, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни. Если бы стол для ведения переговоров имел длину 30 метров, а поезд двигался со скоростью 16 км/ч, наблюдатели на платформе могли бы «увидеть», что свет достиг президента Форляндии на одну миллионную одной миллиардной доли секунды раньше, чем он дошел до президента Бэкиндии. Это различие действительно существует, но оно столь мало, что не может быть обнаружено непосредственно с помощью человеческих чувств. Если бы поезд двигался гораздо быстрее, скажем, со скоростью 270 000 км/с, то с точки зрения наблюдателя, находящегося на платформе, свет дошел бы до президента Бэкиндии за время, в 20 раз большее, чем до президента Форляндии. При высоких скоростях поразительные эффекты специальной теории относительности становятся все более заметными.

Влияние на время. Часть II

Дать абстрактное определение времени трудно — попытки сделать это часто кончаются отсылкой на само слово «время» или приводят к запутанным лингвистическим конструкциям, цель которых состоит в том, что

бы избежать употребления этого слова. Вместо того чтобы идти этим путем, можно принять прагматическую точку зрения и определить время как то, что измерится с помощью часов. Конечно, это переносит бремя определения на слово «часы»; мы можем довольно нестрого определить часы как устройство, которое совершает идеально регулярные циклы движения. В этом случае можно измерять промежутки времени, подчитывая число циклов, выполненных нашими часами. Обычные часы, например, наручные часы, удовлетворяют этому определению — в них имеются стрелки, совершающие равномерные циклы движения, и мы действительно можем измерять протекшее время, подчитывая число оборотов (или долей оборотов), которые стрелка совершит за время между выбранными событиями.

Конечно, выражение «идеально регулярные циклы движения» неявно использует понятие времени, поскольку слово «равномерные» означает одинаковую длительность каждого цикла. С практической точки зрения мы решаем эту задачу, изготавливая часы из простых физических компонентов, которые основаны на фундаментальных явлениях и, согласно нашим представлениям, будут участвовать в повторяющихся циклических процессах, никак не изменяющихся от цикла к циклу. Простыми примерами являются делушкины часы с качающимися туда-сюда маятником, а также атомные часы, основанные на повторяющихся атомных процессах.

Наша цель состоит в том, чтобы понять, как движение влияет на ход времени. Поскольку мы определили время, используя понятие часов, мы можем заменить наш вопрос другим: «Как движение влияет на ход часов?» Важно в самом начале подчеркнуть, что наше обсуждение не будет касаться того, как механические элементы конкретных часов реагируют на толчки и удары, которые могут возникать при движении по тряской дороге. Мы будем рассматривать только простейший и самый ясный тип движения с совершенно постоянной скоростью. Следовательно, часы не будут испытывать никакой тряски или ударов. Нас будет интересовать фундаментальный вопрос: как движение влияет на ход времени, т. е. в чем состоит фундаментальное

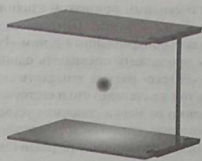


Рис. 2.1. Световые часы состоят из двух параллельных зеркал, между которыми движется фотон, попеременно отражаясь от каждого из них. Часы «тикают» каждый раз, когда фотон завершает свой путь туда и обратно

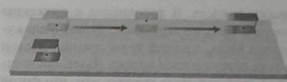


Рис. 2.2. На переднем плане расположены неподвижные световые часы. Световые часы, расположенные в глубине, движутся с постоянной скоростью



Рис. 2.3. С нашей точки зрения фотон в движущихся часах перемещается по диагональному пути

влияние движения на ход *всех* часов, независимо от их внешнего вида или конструкции.

Для этой цели мы будем использовать самые простые по принципу действия (но и самые непрактичные) часы. Они известны под названием «световых часов» и состоят из двух зеркал, закрепленных друг напротив друга, между которыми движется один фотон, попеременно отражаясь от каждого из них (см. рис. 2.1). Если зеркала расположены на расстоянии примерно 15 см друг от друга, путешествие фотона «туда и обратно» между зеркалами займет примерно одну миллиардную долю секунды. Будем считать, что один «тик» часов происходит каждый раз, как фотон завершает свой путь туда и обратно; следовательно, один миллиард тиков соответствует одной секунде.

Мы можем использовать световые часы как секундомер для измерения времени, прошедшего между двумя событиями — для этого мы подчитываем, сколько тиков этих часов произошло в течение интересующего нас периода, и умножим это число на длительность одного тика. Например, если мы хронометрируем лошадиные бег и установили, что число тиков движения фотона между стартом и финишем составило 55 миллиардов, мы можем утверждать, что скачки длились 55 секунд.

Причина, по которой мы используем световые часы, состоит в том, что их механическая простота не требует лишних деталей и, тем самым, дает ясное понимание того, как движение влияет на ход времени. Для того чтобы убедиться в этом, представим себе,

что мы наблюдаем за ходом световых часов, стоящих на соседнем столе. Затем вдруг появляются вторые световые часы, движущиеся мимо первых с постоянной скоростью (см. рис. 2.2). Вопрос, который мы задаем, состоит в следующем: будут ли движущиеся часы идти с той же скоростью, что и неподвижные?

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим с нашей точки зрения путь, который должен пройти фотон в движущихся часах за время одного тика. Фотон начинает свой путь от основания движущихся часов, как показано на рис. 2.2, и сначала движется к верхнему зеркалу. Поскольку с нашей точки зрения сами часы движутся, фотон должен перемещаться под углом, как показано на рис. 2.3. Если фотон не будет двигаться по этому пути, он не попадет в верхнее зеркало и вылетит из часов. Поскольку наблюдатель, находящийся на движущихся часах, с полным основанием может считать эти часы неподвижными, а еще окружающий мир движущимся, мы уверены, что фотон *попадет* в верхнее зеркало и, следовательно, изображенная траектория является правильной. Фотон отражается от верхнего зеркала и снова движется по диагонали, для того чтобы попасть в нижнее зеркало. Этим завершается тик движущихся часов. Простой, но существенный момент состоит в том, что удвоенный диагональный путь, который представляется траекторией движения фотона, *длиннее*, чем путь вверх-вниз по прямой, по которому движется фотон в непо-

движных часах. В дополнение к движению вверх и вниз по вертикали, фотон в движущихся часах, с нашей точки зрения, должен также перемещаться вправо. Далее, постоянство скорости света говорит нам, что фотон в движущихся часах перемещается с той же скоростью, что и фотон в неподвижных часах. Но поскольку он должен пройти большее расстояние, чтобы выполнить один тик, его тики будут *более редкими*. Этот простой аргумент устанавливает, что с нашей точки зрения движущиеся световые часы будут идти медленнее, чем неподвижные. И, поскольку мы согласились, что число тиков непосредственно отражает продолжительность прошедшего времени, мы видим, что для движущихся часов ход времени замедляется.

У читателя может возникнуть вопрос, не может ли это быть просто отражением какого-то особого свойства световых часов, которое не распространяется на делущий хронометр или на часы фирмы «Ролекс». Будет ли время, измеренное более привычными часами, тоже замедляться? Использование принципа относительности дает нам в ответ обнадеживающее «да». Закрепим часы «Ролекс» на верхней части кажда из наших световых часов и вернемся к предыдущему эксперименту. Как уже говорилось, неподвижные часы и прикрепленный к ним «Ролекс» измеряет одинаковое время, при этом одному миллиарду тиков световых часов будет соответствовать одна секунда, измеренная «Ролексом». А как насчет движущихся световых часов и того «Ролекса», который прикреплен к ним? Замедлится ли ход движущегося «Ролекса», будет ли он идти синхронно со световыми часами, на которых он закреплен? Чтобы сделать наше рассуждение более убедительным, представим, что установка, состоящая из световых часов и прикрепленного к ним «Ролекса», движется по тому, что она прикреплена болтами к полу не имеющего окон вагона поезда, движущегося по идеально прямым рельсам с постоянной скоростью. Согласно принципу относительности, для наблюдателя, находящегося в поезде, не существует способа обнаружить какое-либо влияние движения поезда. Однако если световые часы и «Ролекс» не будут показывать одинаковое время, это как раз

и будет очевидным признаком влияния движения. Таким образом, движущиеся световые часы и прикрепленный к ним «Ролекс» должны продолжать показывать одинаковое время; «Ролекс» должен замедлить свой ход ровно в той же степени, что и световые часы. Независимо от марки, типа или устройства, часы, которые движутся друг относительно друга, будут регистрировать различный ход времени.

Обсуждение световых часов показывает также, что точная разница в показаниях времени между неподвижными и движущимися часами зависит от того, насколько далеко должен переместиться фотон в движущихся часах, чтобы завершить элементарный цикл. Это, в свою очередь, зависит от того, насколько быстро перемещаются движущиеся часы: с точки зрения неподвижного наблюдателя, чем быстрее двигаются часы, тем дальше вправо должен улететь фотон. Таким образом, мы приходим к выводу, что при сравнении с неподвижными часами ход движущихся часов будет становиться тем медленнее, чем быстрее они движутся³⁾.

Чтобы получить представление о масштабах описываемого явления, заметим, что фотон совершает свой тик за время, равное примерно одной миллиардной доле секунды. Чтобы часы могли пройти заметное расстояние в течение одного тика, они должны двигаться очень быстро — их скорость должна составлять существенную долю скорости света. При движении с обычными скоростями, скажем, 16 км/ч, расстояние, на которое он переместится вправо за один тик, будет микроскопическим — всего около 0,5 микронных долей сантиметра. Дополнительное расстояние, которое должен пройти движущийся фотон, будет ничтожным и, соответственно, ничтожным будет влияние на скорость хода движущихся часов. Опять же, в силу принципа относительности, это справедливо для всех часов, т.е. для самого времени. Поэтому существа типа нас, перемещающиеся по отношению друг к другу со столь малыми скоростями, обычно остаются в неведении об искажении хода времени. Хотя соответствующие эффекты, конечно, присутствуют, они невяторно малы. С другой стороны, если бы мы могли, при-

хватив с собой движущиеся часы, перемещаться со скоростью, равной, скажем, трем четвертям скорости света, то, согласно уравнениям специальной теории относительности, неподвижный наблюдатель установил бы, что наши часы идут со скоростью, равной двум третям от скорости хода его часов. Согласитесь, это заметная разница.

Жизнь на бегу

Мы увидели, что постоянство скорости света ведет к тому, что движущиеся световые часы будут идти медленнее, чем неподвижные. Согласно принципу относительности, это должно быть справедливо не только для световых, но и для любых других часов, т.е. это должно быть справедливо для самого времени. Для наблюдателя, находящегося в движении, время течет медленнее, чем для неподвижного. Если довольно простое рассуждение, которое привело нас к этому выводу, является верным, то не сможет ли человек прожить дольше, находясь в движении, по сравнению с тем случаем, когда он остается неподвижным? В конце концов, если время течет медленнее для человека, находящегося в движении, по сравнению с тем, кто остается в покое, тогда это различие должно распространяться не только на время, измеренное с помощью часов, но и на время, отсчитанное по ударам сердца, и на старение организма. Неловко было получено прямое подтверждение того, что это действительно так, правда, речь шла не о средней продолжительности жизни человека, а о свойствах частиц микромра — мюонов. Однако здесь есть одна хитрость, которая не позволяет нам объявить, что найден источник вечной молодости.

Мюоны, находящиеся в покое в лаборатории, разрушаются в ходе процесса, который очень напоминает радиоактивный распад, причем средняя продолжительность существования мюона составляет две миллионных доли секунды. Это разрушение представляет собой экспериментальный факт, подтвержденный огромным фактическим материалом. Все это выглядит так, как если бы мюон жил с пистолетом, представ-

ным к виску; когда он достигает возраста в две миллионные доли секунды, он нажимает на спусковой крючок и разлетается на электроны и нейтрино. Однако когда эти мюоны не сидят в покое в лаборатории, а мчатся в устройстве, называемом ускорителем частиц, который разгоняет их почти до скорости света, их средняя продолжительность жизни, измеренная учеными, резко увеличивается. Это действительно происходит. При скорости 298 000 км/с (примерно 99,5% скорости света) время жизни мюона увеличивается в десять раз. Объяснение, согласно специальной теории относительности, состоит в том, что «наручные часы», которые носят мюоны, идут гораздо медленнее, чем лабораторные часы. Поэтому спустя долгое время после того, как лабораторные часы покажут, что мюону пора нажимать на спусковой крючок и погибать, часы, которые носят мчащийся мюон, будут показывать, что до рокового момента еще далеко. Это весьма непосредственная и очень яркая демонстрация влияния движения на течение времени. Если бы люди носились с такой же скоростью, как мюоны, продолжительность их жизни возросла бы во столько же раз. Вместо того чтобы жить семьдесят лет, люди жили бы 700⁴⁾.

Где же подвох? Хотя лабораторные наблюдатели видят, что движущиеся с большой скоростью мюоны живут гораздо дольше, чем их неподвижные собратья, это связано с тем, что для мюонов, находящихся в движении, *время течет намного медленнее*. Это замедление времени распространяется не только на часы, которые они носят, но и на все виды их деятельности. Например, если неподвижный мюон может прочитать 100 книг за время своей короткой жизни, то его мчащийся с большой скоростью родственник сможет прочитать те же самые 100 книг, поскольку, хотя продолжительность его жизни увеличится по сравнению с неподвижным мюоном, скорость чтения, а также всего другого в его жизни уменьшится в такое же число раз. С точки зрения лабораторного наблюдателя это равносильно тому, что движущийся мюон живет медленной жизнью; он живет дольше, чем неподвижный мюон, но «качество жизни»

останется тем же самым. Такой же вывод, конечно, будет справедливым и для мчащихся людей с их средней продолжительности жизни, измеряемой веками. С их точки зрения это будет обычная жизнь. С нашей точки зрения они будут жить в чрезвычайном замедленном ритме и поэтому средняя продолжительность их жизни составит огромный промежуток нашей времени.

И все же: кто движется?

Относительность движения является ключом к пониманию теории Эйнштейна и одновременно источником недоумения. Вы могли заметить, что перестановка точек зрения приводит к взаимному изменению ролей «движущихся» мюонов, чьи часы, как мы установили, идут медленно, и их «неподвижных» собратьев. В случае с Джорджем и Грейс каждый из них имел равное право объявить себя неподвижным, а другого — движущимся. Но мюоны, о которых мы говорим, что они движутся, также имеют все основания сказать, что с их точки зрения неподвижными являются они, а движутся (в противоположном направлении) те мюоны, которые названы «неподвижными». Это ведет к совершенно противоположному выводу, что часы, которые носит мюон, названные нами неподвижными, идут медленно, чем часы мюонов, которых мы считали движущимися.

Рассматривая подписание договора с помощью сигнальной лампы, мы уже сталкивались с ситуацией, в которой различные точки зрения ведут к выводам, выглядящим совершенно несовместимыми. Тогда мы, следуя основным принципам специальной теории относительности, отказались от изжившей себя концепции, состоявшей в том, что каждый, независимо от состояния его движения, согласен с тем, что события произошли одновременно. Однако то противоречие, которое мы рассматриваем сейчас, выглядит хуже. Как может каждый из двух наблюдателей заявлять, что часы другого идут медленно? Еще более поразительно то, что различные, но одинаково правверные точки зрения мюонов, похоже, приводят

к заключению, что каждая группа объявит, мюоны, но твердо, что они умрут первыми. Скорби, что мир может иметь некоторые неожиданно странные свойства, но хранили надежду, что оно хотя бы не будет логически противоречивым. Так что же происходит?

Как и со всеми кажущимися парадоксами, вытекающими из специальной теории относительности, эти логические противоречия разрешаются при более тщательном изучении, позволяя по-новому глубже понять устройство Вселенной. Чтобы избежать еще большего антропоморфизма, возьмем от мюонов к Джорджу и Грейс, которые теперь в дополнение к сигнальным огням имеют на своих скафандрах яркие цифровые часы. С точки зрения Джорджа он неподвижен, а Грейс, с ее зелеными сигнальными огнями и большими цифровыми часами, появляется вдалеке и проплывает мимо него во мраке пустого космического пространства. Он замечает, что часы Грейс идут медленно, чем его часы (степень замедления зависит от скорости, с которой они пролетают мимо друг друга). Если бы он был хоть чуть наблюдательнее, он мог бы заметить, что не только часы у Грейс идут медленно, но и все, что она делает — то, как она помахала ему рукой, скорость, с которой она мигала глазами, — все происходит в замедленном темпе. С точки зрения Грейс те же самые наблюдения относятся к Джорджу.

Это кажется парадоксальным, однако давайте попробуем поставить точный эксперимент. Простейшая возможность состоит в том, чтобы, когда Джордж и Грейс встретятся в пространстве, они оба установили свои часы на 12:00. Так как они путешествуют по отдельности, каждый утверждает, что часы другого отстают. Чтобы избежать этого противоречия, Джордж и Грейс должны встретиться вновь и сравнить, сколько времени прошло на их часах. Но как они могут сделать это? Ну да, у Джорджа ведь есть ракетный двигатель, который он может использовать, чтобы, как он считает, догнать Грейс. Но если он сделает это, симметрия двух точек зрения, которая является причиной парадокса, будет нарушена, поскольку Джорджу придется испытать дей-

ствие ускорения, которое не является свободным движением. Когда они воссоединятся таким манером, часы Джорджа точно будут показывать меньше времени, так как он теперь определенно может сказать, что он был в движении, поскольку ощущал его. Теперь точки зрения Джорджа и Грейс перестают быть равноправными. Включив свой ракетный двигатель, Джордж отказался от утверждения, что он находится в покое.

Если Джордж следует за Грейс подобным образом, различия в показаниях их часов будут зависеть от их относительной скорости и от того, как Джордж использовал свой ракетный двигатель. Как нам уже известно, если скорости малы, различия должны быть минимальными. Но если скорость составляет значительную часть скорости света, различие может достигать минут, суток, лет, веков и более. В качестве конкретного примера представим, что относительная скорость Джорджа и Грейс, когда они разлетаются в разные стороны, составляет 99,5% от скорости света. Далее, пусть по своим часам Джордж ждет 3 года и включает свой ракетный двигатель, который мгновенным толчком посылает его назад к Грейс с той скоростью, с которой они перед этим разлетались, т. е. равной 99,5% скорости света. Когда он достигнет Грейс, по его часам пройдет 6 лет, так как чтобы догнать Грейс, ему нужно 3 года. В то же время, как показывал бы математика специальной теории относительности, по ее часам пройдет 60 лет. Это не шутка: Грейс придется основательно покопаться в памяти, чтобы вспомнить Джорджа, проплывшего мимо нее в пространстве 60 лет назад. С другой стороны, для Джорджа это было всего 6 лет назад. Фактически, движение Джорджа сделало его путешественником во времени, хотя и в очень узком смысле: он совершил путешествие в будущее Грейс.

Необходимость поставить часы рядом, чтобы непосредственно сравнить показания, может показаться незначительной деталью, но в действительности именно в этом суть дела. Можно придумать множество фокусов для того, чтобы обойти это слабое место парадокса, но все они неизбежно провалитесь. Например, пусть вместо того, чтобы соединить часы, Джордж и Грейс сравнят их

показания, созвонившись по сотовому телефону? Если бы такая связь была мгновенной, мы бы столкнулись с непреодолимым противоречием: с точки зрения Грейс часы Джорджа идут медленно, и, следовательно, он должен сообщить, что прошло меньше времени; в то же время с точки зрения Джорджа замедлился ход часы Грейс, поэтому именно она должна сказать, что прошло меньше времени. Они оба не могут быть правы, и мы попадаем в затруднительное положение. Ключевым моментом здесь, конечно, является то, что как любой другой вид связи, сотовые телефоны не могут передавать сообщения мгновенно. Сотовые телефоны используют радиоволны, которые представляют собой разновидности электромагнитных колебаний, следовательно, сигналы, которые они передают, распространяются со скоростью света. Это означает, что необходимо некоторое время на то, чтобы сигналы достигли адресата, что дает достаточную задержку для того, чтобы точки зрения наблюдателей перестали противоречить друг другу.

Попробуем сначала увидеть картину глазами Джорджа. Представим, что через каждый час Джордж повторяет в свой сотовый телефон: «Двенадцать часов дня, полет нормальный»; «час дня, полет нормальный» и т. д. Поскольку с его точки зрения часы Грейс замедлились, на первый взгляд, он подумает, что Грейс будет получать эти сообщения до того, как на ее часах настанет час, указанный в сообщении. Поэтому он будет считать, что Грейс должна согласиться с тем, что ее часы идут медленно. Но потом он подумает: «Поскольку Грейс улетает от меня, сигнал, который я посылаю ей по сотовому телефону, должен проходить все большее расстояние, чтобы достичь ее. Может быть, время, затрачиваемое на то, чтобы пройти это дополнительное расстояние, компенсирует замедление ее часов». Тогда Джорджа о том, что здесь есть два конкурирующих эффекта — замедление хода часов Грейс и время пролета его сигнала, — заставляет его присесть и попытаться количественно оценить суммарный эффект этих двух величин. Полученный им результат показывает, что эффект времени пролета

с избытком компенсирует замедление хода часов Грейс. Он приходит к удивительному выводу, что Грейс будет получать его сообщения о том, что наступил очередной час, *после того*, как этот час наступит на ее часах. В действительности, поскольку Джордж осведомлен о том, что Грейс хорошо знает физику, он понимает, что она учтет время пробега сигнала при оценке хода *его* часов на основе его сообщений по сотовому телефону. Небольшие дополнительные расчеты показывают, что даже с учетом времени пробега выполненный Грейс анализ сообщений Джорджа приведет ее к выводу, что его часы замедлились сильнее, чем ее.

Точно такой же анализ может быть проведен, если мы примем точку зрения Грейс на ее сообщения Джорджу о том, что прошел очередной час. Сначала замедление хода часов Джорджа (с ее точки зрения) заставит ее подумать, что он получит ее очередное сообщение до того, как пошлет свое собственное. Но когда она вспомнит, что ее сигнал должен пройти все увеличивающееся расстояние, чтобы достичь удаленного в темноту Джорджа, она поймет, что на самом деле он будет получать их *после* того как отправит свои. Опять же, она поймет, что даже если Джордж учтет время пробега согласно ее сообщениям по сотовому телефону, он будет считать, что ее часы идут медленнее, чем его.

До тех пор, пока Джордж или Грейс не испытывают ускорения, их точки зрения будут совершенно равно обоснованы. Каким бы парадоксальным это ни казалось, они поймут, что каждый имеет полное право считать, что часы другого замедлили ход.

Влияние движения на пространство

Предыдущее обсуждение показало, что с точки зрения наблюдателя движущегося объект идет медленнее, чем его собственные, т. е. что ход времени зависит от движения. Теперь мы сделаем еще один шаг и увидим, что движение оказывает столь же поразительное влияние на пространство. Вернемся к Слиму и Джиму, которые находятся на автодроме.

Как мы уже говорили, находясь в автосалоне, Слим тщательно измерил рулеткой длину своего нового автомобиля. Когда Слим мчался по гоночной полосе, Джим не мог использовать этот способ для измерения длины автомобиля, поэтому он применил косвенный метод. Один из таких методов, как мы указывали выше, состоит в следующем: Джим запускает секундомер, когда его достигает передний бампер автомобиля, и останавливает, когда мимо проходит задний бампер. Умножив полученное время на скорость автомобиля, Джим может определить его длину.

Используя наше вновь обретенное знание тайн времени, мы понимаем, что с точки зрения Слима сам он неподвижен, а Джим движется и, следовательно, Слим видит, что часы Джима замедлились своей ход. В результате Слиму становится ясно, что косвенное измерение длины автомобиля, проведенное Джимом, даст *заниженное* значение по сравнению с тем, которое он получил в автосалоне, поскольку в своих расчетах (длина равна скорости, умноженной на время) Джим использовал время, полученное с помощью часов, которые замедлили свой ход. Если часы идут медленнее, и время, которое он получил, будет меньше, — в результате его вычисления дадут меньшую длину.

Исходя из этого, Джим поймет, что в движении длина автомобиля Слима меньше, чем когда автомобиль находится в состоянии покоя. Это пример проявления общего принципа, состоящего в том, что наблюдатель видит сокращение движущегося объекта в направлении его перемещения. Например, уравнения специальной теории относительности показывают, что если тело движется со скоростью, составляющей примерно 98% скорости света, то неподвижный наблюдатель будет видеть его сократившимся на 80% по сравнению с длиной тела в состоянии покоя. Это явление иллюстрируется рис. 2.4⁵⁾.

Движение в пространстве-времени

Поступат постоянства скорости света привел к замене традиционного представления о пространстве и времени как о неизменных

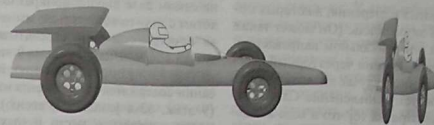


Рис. 2.4. Движущийся объект сокращается в направлении своего движения

и объективных величинах новым понятием, где пространство и время неразрывно зависят от относительного движения наблюдателя и объекта наблюдения. Поняв, что движущиеся объекты сокращаются в направлении движения, мы могли бы на этом закончить обсуждение. Однако специальная теория относительности еще глубже объединяет все рассмотренные нами явления.

Чтобы понять это, представим себе не очень практичный автомобиль, который быстро достигает фиксированной рекомендуемой скорости 160 км/ч и поддерживает ее, не ускоряясь и не замедляясь, пока не будет выключен двигатель, и он прокатится по инерции до остановки.

Представим также, что растущая известность Слима как талантливого пилота привела к тому, что он получил предложение провести испытания этого автомобиля на длинной, прямой и широкой трассе, расположенной посреди плоской равнины в пустыне. Поскольку расстояние между стартом и финишем составляет 16 км, автомобиль должен покрыть это расстояние за одну десятую часть часа, т. е. за шесть минут. Просматривая результаты десятков испытательных заездов, Джим, подрабатывающий автомобильным инженером, столкнулся с тем, что хотя большинство результатов в точности равнялось шести минутам, несколько последних были существенно хуже: 6,5, 7 и даже 7,5 минут. Сначала он заподозрил наличие какой-то неисправности, поскольку такое время указывало на то, что в течение последних трех заездов автомобиль двигался медленнее, чем со скоростью 160 км/ч. Однако тщательное исследование автомобиля убедило его, что тот находится в превосходном состоянии. Не сумев понять причину таких необычных результатов, он

обратился к Слиму, попросив его рассказать об этих последних заездах. Объяснение Слима оказалось простым. Он сказал Джиму, что поскольку трасса проходит с востока на запад, а заезды проходили в конце дня, Солнце било ему прямо в глаза. В течение последних трех заездов условия были столь плохими, что он отклонился от оси трассы на небольшой угол. Он нарисовал свой путь в ходе трех последних заездов, который показан на рис. 2.5. Причина появления трех последних результатов стала совершенно ясна: путь от линии старта до линии финиша при движении под углом к оси трассы будет больше, следовательно, при той же самой скорости в 160 км/ч он займет больше времени. Другими словами, при движении по пути, проходящему под углом, часть скорости в 160 км/ч уходит на движение в направлении с юга на север, в результате на то, чтобы пройти маршрут с востока на запад, останется меньше скорости. Поэтому, чтобы пройти трассу, требуется немного больше времени.

Как уже отмечалось, объяснение Слима является простым и понятным. Однако оно заслуживает того, чтобы немного его перефразировать ради концептуального прорыва. Направления с севера на юг и с востока на запад представляют собой два независимых



Рис. 2.5. Из-за того что Солнце в конце дня светило в глаза, в течение последних трех заездов Слим двигался под все более увеличивающимся углом

пространственных измерения, в которых может двигаться автомобиль. (Он может также перемещаться в вертикальном направлении, например, при движении через горный перевал, однако в данном случае эта возможность нас не интересует.) Объяснение Слима показывает: несмотря на то, что в ходе каждого заезда автомобиль двигался со скоростью 160 км/ч, в тех последних заездах движение разделялось между двумя направлениями, и поэтому казалось, что в направлении восток-запад оно происходит со скоростью меньше 160 км/ч. В предшествующих заездах все 160 км/ч тратились исключительно на движение с востока на запад; в трех последних заездах эта скорость была частично направлена с севера на юг.

Эйнштейн обнаружил, что точно та же идея — разделение движения между различными измерениями — лежит в основе всех замечательных физических проявлений специальной теории относительности, если только мы осознаем, что движение тела определяется не только между пространственными измерениями, но что *временное* измерение также может принимать участие в этом разделении. На самом деле, в большинстве случаев *большая часть* перемещения объекта происходит как раз во времени, а не в пространстве. Посмотрим, что это означает.

Понятие движения в пространстве приходит в нашу жизнь очень рано. Хотя и нечасто приходится думать об этом с такой точки зрения, нам также известно, что мы, наши друзья, окружающие нас вещи и т. д. *двигаются во времени*. Даже если мы праздно сидим перед телевизором и бросаем взгляд на стенные или наручные часы, мы видим, что стрелки на часах неутомимо движутся вперед, постоянно «перемещаясь вперед во времени». Мы и все, что нас окружает, стареем, неизбежно переходя от одного момента времени к следующему. В действительности, математик Герман Минковский, а затем и Эйнштейн являлись сторонниками представления о времени как еще об одном измерении Вселенной, в некоторых отношениях весьма похожим на три пространственных измерения, в которые мы погружены. Хотя это и звучит на первый взгляд абстрактно, понятие времени как измерения

на самом деле вполне конкретно. Когда мы хотим с кем-то встретиться, мы говорим, где «во пространстве» мы рассчитываем встретиться с ним — например, на 9 этаже здания на углу 53-й улицы и 7-й авеню. В этом описании содержится три элемента информации (9 этаж, 53-я улица, 7-я авеню), описывающих конкретное место в трех пространственных измерениях Вселенной. Не менее важным, однако, является указание *времени* нашей встречи, например, в 3 часа пополудни. Эта часть информации говорит нам, где «во времени» состоится наша встреча. Следовательно, события описываются *четырьмя* элементами информации: тремя, указывающими расположение в пространстве, и одним, указывающим положение во времени. Подобные данные, как принято говорить, характеризуют положение события в пространстве и времени или, для краткости, в *пространстве-времени*. В этом смысле время представляет собой еще одно измерение.

Поскольку с этой точки зрения пространство и время являются просто различными примерами измерений, можем ли мы говорить о скорости движения объекта во времени подобно тому, как мы говорим о скорости его движения в пространстве? Да, можем.

Ключ к разгадке того, как это сделать, можно найти в рассмотренных выше основных положениях. Когда тело движется в пространстве относительно нас, его часы идут медленнее по сравнению с нашими. Иными словами, *скорость его движения во времени замедляется*. Новая идея, которую мы должны понять, состоит в следующем. Эйнштейн провозгласил, что все объекты во Вселенной *всегда* движутся в пространстве-времени с одной постоянной скоростью — скоростью света. На первый взгляд, эта идея выглядит странно, — мы привыкли к тому, что объекты обычно движутся со скоростями, которые значительно меньше скорости света. Мы неоднократно подчеркивали, что именно по этой причине релятивистские эффекты столь непривычны в нашей повседневной жизни. Все это правда. Но сейчас мы говорим о суммарной скорости тел во *всех четырех* измерениях — трех пространственных и одном временном, и скорость тела равна скорости света именно в этом обобщенном смысле.

Для того чтобы полнее понять это положение и осознать его важность, заметим, что как в случае с непрактичным «односкоростным» автомобилем, рассмотренным выше, эта одна скорость может быть разделена между различными измерениями пространства и времени. Если тело неподвижно (по отношению к нам) и, следовательно, совсем не движется в пространстве, то, по аналогии с первыми заездами автомобиля, все движение тела приходится на перемещение в одном измерении, — в нашем случае, во временном измерении. Более того, все тела, которые находятся в покое по отношению к нам и друг к другу, движутся во времени (стареют) с совершенно одинаковой скоростью. Однако если тело движется в пространстве, это означает, что часть его движения во времени будет отвлечена. Как в случае с автомобилем, движущимся под углом, это разделение движения означает, что во времени тело будет двигаться медленнее, чем его неподвижные собратья, поскольку часть его движения будет отвлечена на перемещение в пространстве. Это означает, что часы будут идти медленнее, если они перемещаются в пространстве. Именно с этим мы сталкивались ранее. Теперь мы видим, что время замедляется, когда тело движется относительно нас потому, что оно отвлечает часть своего движения во времени на движение в пространстве. Таким образом, скорость движения тела в пространстве является просто отражением того, какая часть отвлечается от движения тела во времени⁽⁶⁾.

Мы также видим, что отсюда немедленно следует факт существования ограничения на скорость тела в пространстве: максимальной возможная скорость движения в пространстве будет достигнута, если все движение тела во времени перейдет в движение в пространстве. Это происходит тогда, когда *все* движение со скоростью света во времени направляется на движение со скоростью света в пространстве. Но если задействована вся скорость движения во времени, получится *наибольшая скорость* движения в пространстве, которую только может развить любое тело. В нашем примере с автомобилем это соответствует случаю, когда автомобиль движется строго в направ-

лении север-юг. У автомобиля в этом случае не остается скорости на движение в направлении восток-запад. Так и у тела, перемещающегося в пространстве со скоростью света, не остается скорости на движение во времени. Поэтому фотоны никогда не стареют; фотон, который был излучен во время Большого взрыва, имеет тот же самый возраст, который он имел тогда. Ход времени останавливается по достижении скорости света.

Как насчет $E = mc^2$?

Хотя Эйнштейн не был сторонником того, чтобы его теория называлась «теорией относительности» (предлагая вместо этого термин «теория инвариантности», которое, помимо всего прочего, отражает неизменность скорости света), теперь нам понятен смысл этого термина. Работа Эйнштейна показала, что понятия пространства и времени, которые раньше казались независимыми и абсолютными, на самом деле тесно взаимосвязаны и являются относительными. Эйнштейн пошел дальше и выяснил, что и другие физические характеристики мироздания неожиданно тесно связаны между собой. Его самое знаменитое уравнение дает один из наиболее важных примеров такой связи. В этом уравнении Эйнштейн утверждает, что энергия объекта (E) и его масса (m) не являются независимыми величинами; зная массу, мы можем определить энергию (умножив массу на квадрат скорости света, c^2), а зная энергию, мы можем рассчитать массу (разделив энергию на квадрат скорости света). Иными словами, энергия и масса, подобно долларам и евро, являются конвертируемыми валютами. Однако в отличие от денег, обменный курс, равный квадрату скорости света, зафиксирован раз и навсегда. Поскольку этот обменный курс столь велик (c^2 — очень большое число), то энергии, сосредоточенной в небольшой массе, может хватить надолго. Мир уже столкнулся с огромной разрушительной мощью, возникшей при превращении менее одного процента от 900 граммов урана в энергию в Хиросиме. Наступит день,

когда, используя термоядерные энергетические установки, мы сможем продуктивно использовать формулу Эйнштейна для удовлетворения энергетических потребностей всего человечества с помощью неисчерпаемых запасов морской воды. С точки зрения положений, которые мы развивали в этой главе, уравнение Эйнштейна дает наиболее четкое объяснение фундаментальному факту, состоящему в том, что ничто не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света. У вас может возникнуть вопрос, почему, например, нельзя взять какой-нибудь объект, скажем мюон, разогнать его на ускорителе до 298 000 км/с, т. е. до 99,5 % скорости света, потом «толкнуть его чуть сильнее», сообщив ему скорость в 99,9 % световой, а после этого «врезать ему по-настоящему», заставив пробить барьер световой скорости. Формула Эйнштейна объясняет, почему подобные усилия никогда не увенчаются успехом. Чем быстрее движется тело, тем выше его энергия, а, как показывает формула Эйнштейна, чем больше энергия тела, тем больше его масса. Например, мюон, двигающийся со скоростью, составляющей 99,9 % световой, весит намного больше, чем его неподвижные собратья. В действительности он

будет примерно в 22 раза тяжелее. (Массы, приведенные в табл. 1.1, относятся к частицам, находящимся в состоянии покоя.) Но чем больше масса объекта, тем труднее увеличить его скорость. Подталкивать ребенка, едущего на велосипеде, — это одно, а толкать тяжелый грузовик — совсем другое. Поэтому, чем быстрее движется мюон, тем труднее увеличить его скорость. При скорости, составляющей 99,999 % скорости света, масса мюона увеличится в 224 раза; при скорости в 99,99999999 % от световой она возрастет более чем 70 000 раз. Поскольку масса мюона неограниченно возрастает при приближении его скорости к скорости света, потребуется затратить бесконечно большое количество энергии, чтобы он достиг или преодолел световой барьер. Это, конечно, невозможно, и поэтому ничто не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света.

Как мы увидим в следующей главе, этот вывод посеял семена второго крупного противоречия, с которым столкнулись физики в течение прошлого столетия, и которое, в конечном счете, обрекло на гибель еще одну почтенную и уважаемую теорию — ньютоновскую универсальную теорию тяготения.

Глава 3

Об искривлениях и волнистой ряби

В специальной теории относительности Эйнштейн разрешил конфликт между накопленными за века интуитивными представлениями о движении и постоянством скорости света. Вкратце его выводы состояли в том, что наша интуиция имеет изъяны — она срабатывает при скоростях, которые обычно чрезвычайно малы по сравнению со скоростью света и поэтому скрывают истинную суть пространства и времени. Специальная теория относительности раскрыла их природу и показала, что она радикально отличается от существовавших ранее представлений. Однако переосмысленные понятия пространства и времени оказались нелегким делом. Эйнштейн вскоре осознал, что одно из многочисленных следствий специальной теории относительности является особенно глубоким: утверждение, что ничто не может превзойти скорость света, оказалось несовместимым со всеми уважаемой ньютоновской теорией всемирного тяготения, сформулированной во второй половине XVII в. Таким образом, разрешив одно противоречие, специальная теория относительности породила другое. После десятилетия интенсивных, иногда мучительных исследований, Эйнштейн разрешил эту дилемму в общей теории относительности. В этой теории он еще раз совершил революцию в понимании свойств пространства и времени, показав, что они искривляются и деформируются, передавая действие силы тяжести.

Ньютоновский взгляд на гравитацию

В 1642 г. в Линкольншире в Англии родился Исаак Ньютон, который изменил ди-

цо науки, поставив всю мощь математики на службу физическим исследованиям. Интеллект Ньютона был столь всеобъемлющ, что, например, когда он однажды обмаржид, что не существует математического аппарата, требуемого для проводимых им исследований, он создал его. Прошло почти три столетия, прежде чем наш мир снова посетил гений сопоставимого масштаба. Ньютону мы обязаны многим глубоким проникновениями в сущность мироздания. Для нас первостепенное значение будет иметь его теория всемирного тяготения.

Сила тяжести везде вокруг нас в повседневной жизни. Она удерживает нас и все окружающие тела на поверхности Земли, не позволяет воздуху, которым мы дышим, ускользнуть в космическое пространство, удерживает Луну на орбите вокруг Земли, а Землю — на орбите вокруг Солнца. Сила тяжести диктует ритм космического танца, который неустанно и педантично исполняется миллиардами миллиардов обитателей Вселенной, от астероидов до планет, от звезд до галактик. Более трех столетий авторитет Ньютона заставлял нас принимать на веру, что одна только сила тяготения отвечает за все разнообразие земных и внеземных событий. Однако до Ньютона не было понимания того, что падение яблока с дерева есть проявление того же закона, который удерживает планеты на орбитах вокруг Солнца. Сделав отважный шаг в сторону регемони науки, Ньютон объединил физические принципы, управляющие Землей и небесами, и объявил силу тяжести невидимой рукой, действующей в обеих сферах.

Ньютоновскую концепцию тяготения можно было бы назвать великим уравнителем. Ньютон объявил, что абсолютно все

оказывает воздействие на абсолютно все во Вселенной. Это воздействие представляет собой силу тяжести, которая является силой притяжения. Независимо от физической структуры, все оказывает и все испытывает воздействие силы тяжести. Основываясь на тщательном анализе проведенного Иоганнесом Кеплером изучения движения планет, Ньютон пришел к выводу, что сила гравитационного притяжения между двумя телами зависит *только* от двух величин: от количества вещества в каждом теле и от расстояния между ними. Вещество означает материю, состоящую из протонов, нейтронов и электронов, которые, в свою очередь, определяют массу объекта. Ньютоновская теория всемирного тяготения утверждает, что сила притяжения между двумя телами будет больше для тел большей массы и меньше для тел меньшей массы; она также утверждает, что сила притяжения увеличивается при уменьшении расстояния между телами, и уменьшается при увеличении расстояния.

Ньютон не просто дал это качественное описание, он сделал больше, сформулировав уравнения, количественно описывающие силу тяжести, действующую между двумя телами. Конкретно, эти уравнения утверждают, что сила тяготения между двумя телами пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Этот «закон тяготения» может быть использован для предсказания движения планет и комет вокруг Солнца, Луны вокруг Земли и ракет, отправляющихся для исследования планет, а также для решения более приземленных задач — расчета траектории полета мячика или прыгуна с трамплина, крутящего сабель на бассейне. Согласие между предсказаниями и результатами наблюдений за фактическим движением тел является поразительным. Этот успех обеспечил теории Ньютона безоговорочную поддержку вплоть до первой половины XX в. Однако открытие Эйнштейном специальной теории относительности выдвинуло проблемы, ставшие непреодолимым препятствием для теории Ньютона.

Несовместимость ньютоновской теории тяготения и специальной теории относительности

Главной особенностью специальной теории относительности является существование абсолютного барьера для скорости, устанавливаемого скоростью света. Важно понимать, что этот предел относится не только к материальным телам, но также к сигналам и воздействиям любого рода. Не существует способа передать информацию или возмущение из одного места в другое со скоростью, превышающей скорость света. Конечно, в природе есть масса способов распространения возмущений со скоростью, *меньшей* скорости света. Например, наша речь и другие звуки передаются с помощью колебаний, распространяющихся в воздухе со скоростью около 330 м/с, что ничтожно мало по сравнению со скоростью света, равной 300 000 км/с. Эта разница скоростей становится очевидной, если наблюдать за бейсбольным матчем с мест, расположенных далеко от поля. Когда падающий бьет по мячу, звук достигает вас спустя несколько мгновений *после* того, как вы увидели удар. Похожие вещи происходят во время грозы. Хотя вспышка молнии и удар грома происходят одновременно, мы видим молнию раньше, чем слышим гром. Это снова является отражением значительной разницы в скоростях света и звука. Успех специальной теории относительности говорит нам, что обратная ситуация, когда какой-нибудь сигнал достигнет нас *раньше*, чем свет, излученный одновременно с этим сигналом, попросту невозможна. Ничто в мире не может обогнать фотоны.

Здесь и лежит камень преткновения. В теории тяготения Ньютона одно тело притягивает другое с силой, которая зависит только от масс этих тел и расстояния между ними. Эта сила никак не зависит от того, насколько долго тела находились рядом друг с другом. Это означает, что если их массы или расстояния между ними изменятся, то тела, согласно Ньютону, *немедленно* почувствуют изменение взаимного гравитационного притяжения. Например, ньютоновская теория тяго-

тения утверждает, что если Солнце внезапно взорвется, то Земля, расположенная на расстоянии примерно 150 млн км от него, мгновенно сойдет со своей обычной эллиптической орбиты. Несмотря на то, что вспышка света от взрыва дойдет от Солнца до Земли только через восемь минут, в теории Ньютона сведения о том, что Солнце взорвалось, будут переданы на Землю мгновенно, посредством внезапного изменения силы тяготения, управляющей движением планеты.

Этот вывод находится в прямом противоречии со специальной теорией относительности, поскольку последняя уверяет, что никакая информация не может быть передана со скоростью, превышающей скорость света. Мгновенное распространение тяготения в максимально возможной степени нарушает это принятие.

Таким образом, в начале XX в. Эйнштейн осознал, что невероятно успешная теория тяготения Ньютона находится в противоречии со специальной теорией относительности. Уверенный в истинности специальной теории относительности, Эйнштейн, невидя на огромное количество экспериментальных данных, подтверждающих теорию Ньютона, стал работать над новой теорией гравитации, которая была бы совместима со специальной теорией относительности. Это, в конечном счете, привело его к открытию общей теории относительности, в которой характер пространства и времени вновь претерпел поразительные изменения.

Самая счастливая идея Эйнштейна

Еще до открытия специальной теории относительности был ясен один существенный недостаток ньютоновской теории тяготения. Хотя теория чрезвычайно точно предсказывала движение тел под действием силы тяготения, она ничего не говорила о том, что *представляет собой* тяготение. Иными словами, как получается, что два тела, разделенные расстоянием в сотни миллионов километров и более, тем не менее, оказывают влияние на движение друг друга? Каким образом тяготение выполняет свою мис-

сию? Сам Ньютон вполне осознавал существование этой проблемы. По его собственным словам «...непостижимо, чтобы неодушевленная, грубая материя могла без посредства чего-либо нематериального действовать и влиять на другую материю без взаимного соприкосновения, как это должно бы происходить, если бы тяготение в смысле Эпикура было существованием и врожденным в материи. Предполагать, что тяготение является существованием, неразрывным и врожденным свойством материи, так что тело может действовать на другое на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо передавая действие и силу, — это, по-моему, такой абсурд, который немислимы ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах. Тяготение должно вызываться агентом, постоянно действующим по определенным законам. Является ли, однако, этот агент материальным или нематериальным, решать это я предоставил моим читателям»¹⁾.

Это говорит о том, что Ньютон принимал существование тяготения, и разрабатывал уравнения, которые с высокой точностью описывают его действие, но никогда не предлагал никакого механизма, объясняющего, как оно работает. Он оставил миру «руководство пользователя» по гравитации с описанием того, как ее «использовать». Физики, астрономы и инженеры успешно применяли эти инструкции для прокладки курса ракет к Луне, Марсу и другим планетам Солнечной системы, для прогноза солнечных и лунных затмений, для предсказания движения комет и т. п. Но внутренний механизм — содержание «черного ящика» гравитации — Ньютон оставил под покровом тайны. Когда вы пользуетесь плеером для компакт-дисков или персональным компьютером, вы обычно находите в таком же состоянии неведения об их внутреннем устройстве. Коль скоро вы знаете, как обращаться с исправным устройством, ни вам, ни кому-либо другому не требуется знать, *каким образом* оно выполняет ваши задания. Но когда ваш плеер или персональный компьютер выходит из строя, возможность его починки решающим образом зависит от знания его внутреннего устройства. Аналогично Эйнштейн

осознал, что, несмотря на сотни лет экспериментального подтверждения ньютоновской теории, специальная теория относительности обнаружила едва уловимую внутреннюю «неисправность», а устранив этой неисправности потребует решить вопрос об истинном механизме тяготения.

В 1907 г., обдумывая эти вопросы за своим столом в патентном бюро швейцарского города Берна, Эйнштейн сумел нащупать центральную идею, которая, после ряда успехов и неудач, в конечном счете привела его к радикально обновленной теории тяготения. Предложенный Эйнштейном подход не просто воплотил пробелы в ньютоновской теории, но совершенно изменил наши представления о тяготении, и, что очень важно, оказался полностью совместимым со специальной теорией относительности.

Подход, предложенный Эйнштейном, имеет отношение к вопросу, который беспокоил нас на всем протяжении главы 2. Там мы интересовались, как выглядит мир для двух наблюдателей, двигающихся относительно друг друга с постоянной скоростью. Тщательно сравнивая точки зрения этих двух наблюдателей, мы получили ряд удивительных выводов о сущности пространства и времени. А что можно сказать о наблюдателях, находящихся в состоянии *ускоренного* движения? Точки зрения этих наблюдателей труднее поддаются анализу, чем в случае наблюдателей, степенно движущихся с постоянной скоростью. Тем не менее, можно поставить вопрос, существует ли способ разрешить эти трудности и осмыслить ускоренное движение в соответствии с новым уровнем понимания пространства и времени.

«Самая счастливая идея» Эйнштейна объясняет, как сделать это. Чтобы понять ее, вообразим, что сейчас 2050 г. и вы являетесь главным экспертом ФБР по взрывчаткам веществам. К вам обращаются с отчаянной мольбой срочно исследовать объект, который, по-видимому, является бомбой изощренной конструкции, заложеной в самом центре Вашингтона. Поспешив на место действия и осмотрев бомбу, вы видите, что сблизив ваши самые худшие предчувствия — бомба является атомной и имеет такую мощ-

ность, что даже если поместить ее глубоко под землю или на дно океана, последствия от взрыва будут опустошительными. После внимательного изучения детонирующего устройства вы видите, что обезвредить его невозможно и, более того, оно содержит защиту нового типа. Бомба смонтирована на весах. Как только показания весов изменятся более чем на 50 % от того значения, которое они показывают сейчас, бомба взорвется. Изучив часовой механизм, вы видите, что в вашем распоряжении осталась всего неделя. От ваших действий зависит судьба миллионов людей — что же делать?

Итак, смирившись с тем, что на земле и под землей нет безопасного места, где можно было бы взорвать бомбу, вы приходите к выводу, что остается только один выход: необходимо запустить ее в космос, где взрыв не причинит ущерба никому. Вы высказываете эту идею на совещании вашей команды в ФБР, и почти немедленно молодой сотрудник перечеркивает этот план. «В вашем предложении есть серьезный изъян», — говорит ваш ассистент Исаак. — Когда устройство будет удалиться от Земли, его вес начнет уменьшаться, поскольку гравитационное притяжение со стороны Земли будет ослабевать. Это означает, что показания весов внутри устройства уменьшатся, что приведет к детонации задолго до того, как бомба удалится на безопасное расстояние». Прежде чем вы успеете полностью осмыслить это возражение, в разговор вмешивается другой молодой человек. «На самом деле здесь есть одна проблема, которую нам следует обсудить, — заявляет ваш другой ассистент Альберт. — Она столь же важна, как та, на которую указал Исаак, но является более тонкой, поэтому следите внимательно за моим объяснением». Желая взять минуту на размышление, чтобы обдумать возражение Исаака, вы пытаетесь отмахнуться от Альберта, но если уж он начал говорить, остановить его невозможно.

«Для того чтобы запустить устройство в открытый космос, мы должны поместить его на ракету. Чтобы улететь в космическое пространство, ракета должна ускориться, поэтому показания на весах увеличатся, и взрыв снова произойдет преждевременно.

Основание бомбы, которое стоит на весах, будет давить на весы сильнее, чем когда оно находится в покое. Это похоже на то, как ваше тело прижмется к сиденью автомобиля при разгоне. Бомба „валится“ в весы точно так же, как ваша спина в спинку сиденья. Под давлением показания весов увеличатся, и это приведет к взрыву, как только увеличение превысит 50 %».

Вы благодарите Альберта за его комментарий, но мысленно откладываете его в сторону, поскольку по своим последствиям оно совпадает с замечанием Исаака, и безработно констатируете, что для того, чтобы убить идею, достаточно одного выстрела, и наблюдение Исаака, которое, несомненно, является правильным, уже сделало это. Без особой надежды вы спрашиваете, есть ли еще идеи. В этот момент Альберта посещает озарение. «Хотя, взвесив все еще раз, — продолжает он, — ваша идея вовсе не кажется мне безнадёжной. Замечание Исаака о том, что сила тяжести уменьшается при подъеме в космическое пространство, означает, что показания весов будут уменьшаться. Мое наблюдение, состоящее в том, что ускорение ракеты при движении вверх заставит устройство давить на весы сильнее, означает, что показания весов будут увеличиваться. В итоге это означает, что в каждый момент следует поддерживать ускорение на таком уровне, чтобы эти два эффекта *нейтрализовали друг друга!* А именно, на ранних стадиях подъема, пока ракета ощущает полную мощь земного тяготения, она может ускориться не очень сильно, так, чтобы оставаться в границах пятидесятипроцентного допуска. По мере того, как ракета будет удаляться все дальше от Земли, а сила ее притяжения будет ослабевать, мы должны увеличить ускорение для того, чтобы компенсировать это ослабление. Увеличение показаний весов из-за ускорения может быть сделано в точности равным уменьшению показаний из-за ослабления гравитационного притяжения. Это означает, что в действительности можно сделать так, чтобы показания весов совсем не менялись!»

Предложение Альберта начинает постепенно до вас доходить. «Иными словами — говорите вы, — ускорение может быть заме-

ной тяготения. Мы можем имитировать действие силы тяжести правильно подобранным ускоренным движением».

«Совершенно верно», — подтверждает Альберт.

«Итак, — продолжаете вы, — мы можем запустить бомбу в космос и, соответствующим образом регулируя ускорение ракеты, гарантировать, что показания весов не изменятся и бомба не взорвется до тех пор, пока не удалится на безопасное расстояние от Земли». Таким образом, если вы заставите гравитацию и ускорение играть друг против друга, используя для этого возможности ракетной техники XXI в., то сможете избежать катастрофы.

Осознание глубокой связи между гравитацией и ускоренным движением представлял собой главное озарение, снизошедшее на Эйнштейна в один счастливый день в патентном бюро Берна. Хотя эксперимент с бомбой уже высветил суть этой идеи, она заслуживает того, чтобы переработать ее в терминах, использованных в главе 2. Для этого вспомним, что если мы находимся в закрытом вагоне, не имеющем окон и не испытывающем ускорения, то не существует способа, с помощью которого мы могли бы определить скорость своего движения. Купе внутри будет продолжать выглядеть совершенно одинаково, и любые эксперименты дадут вам тождественные результаты независимо от скорости движения. Более того, не имея внешних ориентиров для сравнения, вы даже не сможете определить, движетесь ли вы вообще. С другой стороны, если вы ускоритесь, то даже если доступная вам область ограничена внутренностью купе, вы почувствуете силу, действующую на ваше тело. Например, если купе, в котором вы сидите, обращено вперед по ходу движения и прикручено к полу вагона, вы почувствуете силу, с которой спинка кресла будет давить на вас, совсем как в примере, приведенном Альбертом. Аналогично, если купе испытывает ускорение, направленное вверх, вы почувствуете силу, действующую на ваши ноги со стороны пола. Идея Эйнштейна состояла в том, что, оставаясь в закрытом купе, вы не сможете определить, когда на вас действует *ускорение*, а когда

сила тяготения: если их величины совпадают, сила, создаваемая ускоренным движением, и сила, возникающая под действием гравитационного поля, неразличимы. Если ваше купе неподвижно стоит на поверхности Земли, вы чувствуете привычную силу, действующую на ваши ноги со стороны пола; точно такими же будут ощущения, если вы ускорено движетесь вверх. Это та самая эквивалентность, которую Альберт использовал для решения проблемы с запуском в космос оставленной терристам бомбы. Если вагон опрокинется, вы почувствуете со стороны спинки кресла силу (не дающую вам упасть), которая будет такой, как если бы вагон ускорился в горизонтальном направлении. Эйнштейн назвал неразличимость ускоренного движения и гравитации *принципом эквивалентности*. Этот принцип составляет основу общей теории относительности³¹.

Описание, приведенное выше, показывает, что общая теория относительности завершает работу, начатую специальной теорией относительности. Используя принцип относительности, специальная теория относительности провозглашает равноправие точек зрения наблюдателей: законы физики проявляются одинаковым образом для всех наблюдателей, находящихся в состоянии равномерного движения. Но это равноправие на самом деле является ограниченным, поскольку из него исключается огромное число точек зрения других наблюдателей, находящихся в состоянии ускоренного движения. Прозрение, пришедшее к Эйнштейну в 1907 г., показывает, как охватить все точки зрения — и тех, кто движется с постоянной скоростью, и тех, кто ускорится, — в рамках одной изящной концепции. Поскольку нет различия между ускоренным пунктом наблюдения *в отсутствие* гравитационного поля и неускоренным пунктом наблюдения *в присутствии* гравитационного поля, можно выбрать это последнее описание и провозгласить, что *все наблюдатели, независимо от состояния движения, могут утверждать, что они неподвижны, а остальная часть мира движется рядом с ними, если они подходящим образом введут гравитационное поле в описание своего окружения*. В этом смысле, благодаря включению

гравитации, общая теория относительности гарантирует нам, что все возможные точки зрения являются равноправными. (Как мы увидим ниже, это означает, что различия между наблюдателями в главе 2, которые были основаны на ускоренном движении — как в случае с Джорджем, устремившимся за Грейс, включив свой ранцевый двигатель, и постаревшим меньше, чем она — допускают эквивалентное описание без ускорения, но с гравитацией.)

Эта глубокая связь между гравитацией и ускоренным движением, несомненно, представляет собой блестящую догадку, но почему она сделала Эйнштейна столь счастливым? Причина, попросту говоря, состоит в том, что гравитация — загадочное явление. Это грандиозная сила, пронизывающая жизнь космоса, но она ускользает непонятна. С другой стороны, ускоренное движение, хотя и является несколько более сложным, чем равномерное, является конкретным и вполне материальным. Эйнштейн понял, что, благодаря взаимосвязи между этими явлениями, он может использовать понимание ускоренного движения в качестве мучимого инструмента для достижения такого же понимания гравитации. Претворить эту стратегию в жизнь было нелегко даже для такого гения, как Эйнштейн, но, в конечном счете, этот подход принес свои плоды в виде общей теории относительности. Чтобы достичь этого, Эйнштейну пришлось выковать второе звено цепи, объединяющей гравитацию и ускоренное движение, — *кривизну* пространства и времени, — к обсуждению которой мы сейчас перейдем.

Ускорение и искривление пространства и времени

Эйнштейн работал над проблемой гравитации с предельной, часто чрезмерной интенсивностью. Примерно через пять лет после счастливого озарения в бернском патентном бюро, он писал физику Арнольду Зоммерфельду: «Сейчас я работаю исключительно над проблемой гравитации... одно могу сказать определенно — никогда в моей жизни

я не изнурил себя так, как сейчас... по сравнению с этой проблемой первоначальная (т.е. специальная) теория относительности кажется детской забавой³²».

Следующий ключевой прорыв, касающийся простого, но неочевидного следствия применения специальной теории относительности для установления связи между гравитацией и ускоренным движением, был сделан, по-видимому, в 1912 г. Чтобы понять этот шаг в исследованиях Эйнштейна, проще всего обратиться (как, вероятно, поступил и Эйнштейн) к конкретному примеру ускоренного движения³³. Вспомним, что объект считается ускоренно движущимся, если он изменяет скорость или направление своего движения. Для простоты ограничимся ускоренным движением, в котором скорость остается постоянной, а изменяется только направление движения тела. Конкретно рассмотрим движение по кругу, которое можно увидеть на аттракционе *Верхот на торнадо*. В этом аттракционе вы становитесь внутри большого круга, по краю которого расположена стенка, изготовленная из плексигласа, прижимаетесь спиной к этой стенке, и круг начинает вращаться с большой скоростью. Как при всяком ускоренном движении (вы можете ощутить его), вы почувствуете, что ваше тело отбрасывается по радиусу от центра вращения, а круговая плексигласовая стенка вдавливается в вашу спину, не давая вам вылететь с круга. (На самом деле, хотя это не относится к нашему разговору, вращательное движение «прилепляет» ваше тело к плексигласу с такой силой, что когда планка, на которой вы стоите, уходит из-под ног, вы не падаете, а остаетесь прижатым к стенке.) Если движение плавное, и вы закроете глаза, давление, которое будет действовать на вашу спину в результате вращения, — совсем как давление со стороны матраса в постели — почти способно создать иллюзию, что вы лежите. Слово «почти» связано с тем фактом, что вы продолжаете испытывать действие обычной, «вертикальной» гравитации, которая не дает вашему мозгу одурочить себя. Но если бы вам довелось кататься на этом аттракционе в открытом космосе, и если бы скорость вращения была соответствующей,

вы бы почувствовали себя лежащим в обычной постели на Земле. Более того, если бы вы «встали» и попробовали бы прогуляться по внутренней поверхности вращающейся плексигласовой стенки, ваши ноги ощутили бы точно такое же давление, какое они испытывают на обычном полу. На самом деле, проекты космических станций предусматривают подобное вращение для создания искусственной силы тяжести в космическом пространстве.

Теперь, используя ускоренное движение во вращающемся аттракционе для имитации действия силы тяжести, можно, следуя Эйнштейну, посмотреть, как выглядят пространство и время для тех, кто находится на круге. Его рассуждения в приложении к нашей ситуации были бы такими. Мы, неподвижные наблюдатели, легко можем измерить длину окружности и радиус вращающегося круга. Например, чтобы измерить длину окружности, мы будем аккуратно прикладывать рулетку к ободу вращающегося круга; для измерения радиуса мы будем также аккуратно перемещать рулетку от оси вращения к внешнему краю круга. Как можно предположить, основываясь на школьном курсе геометрии, отношение эти двух величин будет равно 2π (около 6,28), в точности таким же, как для окружности, нарисованной на плоском листе бумаги. А как это будет выглядеть с точки зрения того, кто катается на этом аттракционе?

Чтобы узнать это, мы попросили Слима и Джима, которые как раз катаются на этом аттракционе, выполнить для нас несколько измерений. Мы бросили один из наших рулеток Слиму, который отправился измерять длину окружности, а другому — Джиму, который будет измерять радиус. Чтобы увидеть все наилучшим образом, взглянем на круг с высоты птичьего полета, как показано на рис. 3.1. Мы снабдили снимок стрелками, показывающими мгновенное направление движения в каждой точке. Как только Слим начинает измерять длину окружности, Джим из положения сверху, сразу становится понятно, что он получит не то значение, которое получили мы. Когда он прикладывает рулетку к окружности, мы замечаем, что *ее длина уменьшается*. Это не что иное, как

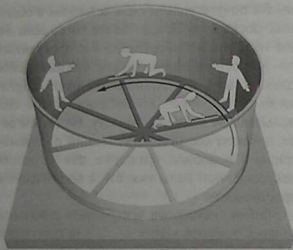


Рис. 3.1. Линейка Слива укорачивается, так как она прикладывается вдоль направления движения круга. Линейка же Джима лежит вдоль радиуса круга, перпендикулярно направлению движения, и поэтому ее длина не уменьшается

обсуждавшееся в главе 2 лоренцево сокращение, которое связано с тем, что длина тела представляется уменьшившейся в направлении его движения. Уменьшение длины рулетки означает, что мы должны будем уложить ее, совмещая начало с концом, *больше* число раз, чтобы обойти весь круг. Так как Слим продолжает считать, что длина рулетки составляет один метр (поскольку между ним и его рулеткой нет относительного перемещения, он думает, что она имеет свою обычную длину в один метр), он измерит *большую* длину окружности, чем мы. (Если это кажется парадоксальным, вам может помочь примечание 5.)

Ну, а что насчет радиуса? Джим использует тот же метод определения радиуса, и нам, с высоты птичьего полета, видно, что он получит такое же значение, которое получили мы. Причина состоит в том, что его рулетка располагается не по мгновенному направлению движения круга (как было при измерении длины окружности). Она направлена под углом 90 градусов к направлению движения и поэтому *не сокращается* в направлении своей длины. Следовательно, Джим получит точно такое же значение величины радиуса, какое получили мы.

Но теперь, рассчитав отношение длины окружности колеса к его радиусу, Слим и Джим получат число, которое будет пре-

вышать полученное нами значение 2π , поскольку у них длина окружности оказалась больше, а радиус остался тем же самым. Что за чудеса? Как может быть, чтобы для какой-нибудь фигуры в форме окружности нарушалось установленное еще древними греками правило, согласно которому для любой окружности это отношение в точности равно 2π ?

Вот объяснение Эйнштейна. Результат древних греков справедлив для окружностей, нарисованных на плоской поверхности. Но полобно тому, как кривые зеркала в парке развлечений искажают нормальную пространственную структуру вашего отражения, так и пространственная форма окружности, так и пространственная форма окружности исказится, если она будет нарисована на искривленной или деформированной поверхности: отношение длины окружности к радиусу для такой окружности, как правило, *не будет* равно 2π .

В качестве примера на рис. 3.2 приведены три окружности одинакового радиуса. Длины этих окружностей различны. Длина окружности (б), нарисованной на искривленной поверхности сферы, меньше длины окружности (а), нарисованной на плоской поверхности, несмотря на то, что они имеют одинаковый радиус. Искривленный характер поверхности сферы приводит к тому, что радиальные линии, проведенные из центра, слегка сходятся друг к другу, приводя к небольшому уменьшению длины окружности. Длина окружности (в), нарисованной на седловидной искривленной поверхности, *больше*, чем длина окружности, изображенной на плоской поверхности. Свойства кривизны седловидной поверхности приводят

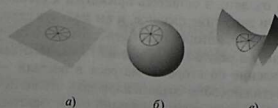


Рис. 3.2. Окружность, нарисованная на поверхности сферы (б), имеет меньшую длину, чем окружность, нарисованная на плоском листе бумаги (а), а окружность, начерченная на седловидной поверхности, будет иметь большую длину, несмотря на то, что все три имеют одинаковый радиус

к тому, что радиальные линии слегка расходятся, вызывая небольшое увеличение длины окружности. Эти наблюдения показывают, что отношение длины окружности к радиусу для (б) будет меньше, чем 2π , а для (в) — больше, чем 2π . Но отклонения от значения 2π , особенно в сторону увеличения, как в примере (в), — это как раз то, что было обнаружено в случае вращающегося аттракциона. Подобные наблюдения привели Эйнштейна к идее, что нарушение «обычной», евклидовой геометрии объясняется кривизной пространства. Плоская геометрия древних греков, которой тысячи лет учат школьников, попросту не применима к объектам на вращающемся круге. Вместо этого здесь имеет место ее обобщение на случай искривленного пространства, схематически показанное на рис. 3.2⁵⁾.

Итак, Эйнштейн понял, что установленные древними греками привычные пространственные геометрические отношения, которые верны для «плоских» пространственных фигур, таких, как окружность на плоском столе, *не выполняются* с точки зрения наблюдателя, испытывающего ускорение. Конечно, мы рассмотрели здесь только один, конкретный вид ускоренного движения, но Эйнштейн показал, что аналогичный результат — искривление пространства — справедлив для всех случаев ускоренного движения.

В действительности, ускоренное движение приводит не только к искривлению пространства, но и к аналогичному искривлению времени. (Исторически Эйнштейн сначала сосредоточил внимание на кривизне времени, и только потом осознал важность кривизны пространства⁶⁾.) То, что время также подвергается искривлению, неудивительно — в главе 2 мы уже видели, что специальная теория относительности провозглашает союз пространства и времени. Это слияние было подытожено поэтическими словами Минковского, который на лекции по специальной теории относительности в 1908 г. сказал: «Отные пространство и время, рассматриваемые отдельно и независимо, обращаются в тени и только их соединение сохраняет самостоятельность»⁷⁾. Пользуясь более приземленным, но столь же вольным языком, можно сказать, что сле-

тая пространство и время в единую ткань пространства-времени, специальная теория относительности провозглашает: «То, что истинно для пространства, то истинно и для времени». Однако здесь возникает вопрос. Мы можем предстать себе искривленное пространство, зная, как искривлена его форма, но что мы имеем в виду, говоря о кривизне времени?

Для того чтобы нащупать ответ, еще раз посядем Слима и Джима на аттракцион и попросим их провести следующий эксперимент. Слим будет стоять на краю радиального отрезка спиной к кругу, а Джим будет медленно ползти к нему вдоль этого радиуса от центра круга. Через каждые несколько метров Джим будет останавливаться, и они будут сравнивать показания своих часов. Что они увидят? Наблюдая со своей позиции с высоты птичьего полета, мы снова сможем предсказать ответ. Их часы будут расходиться в показаниях. Мы пришли к этому выводу потому, что увидели, что Слим и Джим движутся с разной скоростью — при движении на аттракционе чем дальше от центра вы находитесь, тем больше расстояние должны пройти для того, чтобы совершить один оборот, и следовательно, тем быстрее вы движетесь. Но, согласно специальной теории относительности, чем быстрее вы движетесь, тем медленнее идут ваши часы — из этого мы заключаем, что часы Слива будут идти медленнее, чем часы Джима. Далее, Слим и Джим обнаружат, что по мере того как Джим будет приближаться к Слиму, его часы будут идти все медленнее, и скорость их хода будет становиться такой же, как у часов Слива. Это отражает тот факт, что по мере приближения Джима к краю круга, его скорость приближается к скорости Слива.

Мы приходим к выводу, что для наблюдателей на вращающемся круге, таких как Слим и Джим, скорость течения времени зависит от их положения — в нашем случае от их расстояния до центра круга. Это явление иллюстрирует то, что мы понимаем под кривизной времени. Время искривлено, если скорость его хода изменяется от одной точки к другой. Важно подчеркнуть, что Джим заметит кое-что еще, когда будет ползти вдоль радиуса. Он почувствует возрастаю-

щую силу, выталкивающую его с круга, поскольку не только скорость, но и ускорение увеличиваются по мере удаления от центра круга. Используя наш аттракцион, мы видим, что большее ускорение связано с более сильным замедлением хода часов, — т. е. большее ускорение приводит к более значительному искривлению времени.

Эти наблюдения дали возможность Эйнштейну сделать заключительный шаг. Поскольку он уже показал, что гравитацию и ускоренное движение нельзя по существу различить, и поскольку, как он показал теперь, ускоренное движение связано с искривлением пространства и времени, он сделал следующее предположение о внутреннем содержании «черного ящика» гравитации, механизма, с помощью которого действует гравитация. Согласно Эйнштейну, гравитация *представляет собой* искривление пространства и времени. Посмотрим, что это означает.

Основы общей теории относительности

Чтобы почувствовать, в чем суть нового представления о гравитации, рассмотрим типичную ситуацию, в которой планета типа нашей Земли вращается вокруг звезды, похожей на наше Солнце. В ньютоновской теории гравитации Солнце удерживает Землю на некоей неопределяемой «привязи», которая каким-то образом мгновенно преодолевает огромные расстояния в пространстве и захватывает Землю (аналогичным образом и Земля захватывает Солнце). Эйнштейн предложил новую концепцию того, что происходит. Нам будет удобнее обсуждать подход Эйнштейна, имея конкретную наглядную модель пространства-времени, которую было бы удобно манипулировать. Для этого сделаем два упрощения. Во-первых, на какое-то время забудем о времени и сконцентрируемся исключительно на наглядной модели пространства. Позже мы вновь включим время в наше обсуждение. Во-вторых, для того, чтобы иметь возможность рисовать модели и размещать рисунки на страницах этой книги, мы часто будем использовать

двумерные аналоги трехмерного пространства. Большинство выводов, которые мы получим, работая с моделями более низких размерностей, непосредственно применимо к физической трехмерной среде, поэтому более простые модели представляют собой прекрасные средства для объяснения и обучения.

Используя эти упрощения, мы изобразили на рис. 3.3 двумерную модель области нашей Вселенной. Координатная сетка удобна для указания положения, точно так же, как сеть улиц позволяет описать местонахождение в городе. При задании адреса в городе, кроме положения на двумерной сетке улиц, указывается также положение по вертикали, например, указание этажа. Для облегчения визуального восприятия будем отбрасывать третье измерение в наших двумерных моделях.

Эйнштейн высказал предположение, что в отсутствие материи и энергии пространство *будет плоским*. На языке двумерных моделей это означает, что «форма» пространства должна быть плоской, подобно поверхности гладкого стола, как показано на рис. 3.3. Это изображение пространственной структуры нашей Вселенной, которое было общепринятым в течение тысяч лет. Но что произойдет с пространством, если в нем присутствует массивный объект, подобный Солнцу? До Эйнштейна ответом на этот вопрос было слово «ничего»: пространство (и время) считались инертной средой, сценой, на которой события в жизни Вселенной развивались сами по себе. Однако цепочка рассуждений

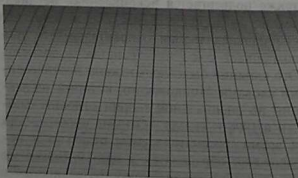


Рис. 3.3. Схематическое представление плоского пространства

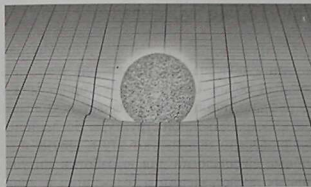


Рис. 3.4. Массивное тело, такое как Солнце, заставляет структуру пространства искривляться подобно тому, как деформируется резиновая пленка, если на нее положить шар для боулинга

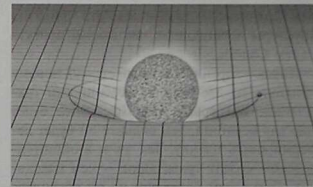


Рис. 3.5. Земля остается на орбите вокруг Солнца потому, что катится по ложбине в искривленной структуре пространства. Говоря более точно, она следует «линии наименьшего сопротивления» в деформированной окрестности Солнца

Эйнштейна, которую мы рассмотрели выше, приводит к другому выводу.

Массивное тело, подобно нашему Солнцу, а на самом деле любое тело, оказывает гравитационное воздействие на другие тела. В примере с бомбой террориста мы установили, что действие гравитационных сил неотлично от действия ускоренного движения. Пример с аттракционом *Верхам на торнадо* показал, что математическое описание ускоренного движения *требует* введения искривленного пространства. Эта связь между гравитацией, ускоренным движением и кривизной пространства привела Эйнштейна к блестящей догадке: присутствие массивного тела, подобного нашему Солнцу, приводит к тому, что структура пространства вокруг этого тела *искривляется*, как показано на рис. 3.4. Полезная и часто используемая аналогия состоит в том, что структура пространства деформируется в присутствии массивных тел, таких как наше Солнце, подобно резиновой пленке, на которую положили шар для боулинга.

Согласно этой радикальной гипотезе, пространство не является просто пассивной ареной событий во Вселенной: форма пространства изменяется под влиянием присутствующих в нем тел.

Это искривление, в свою очередь, влияет на другие тела, движущиеся вблизи Солнца, которые теперь будут перемещаться по деформированному пространству. Используя аналогию с резиновой пленкой и шаром для боулинга, можно сказать, что если мы поместим на пленку шарик и придадим ему

начальную скорость, его траектория будет зависеть от того, присутствует ли в центре пленки массивный шар для боулинга. Если шара для боулинга там нет, резиновая пленка будет плоской, и шарик будет двигаться по прямой. Если шар для боулинга присутствует, он будет искривлять пленку, и шарик будет двигаться по искривленной траектории. Если мы придадим шару соответствующую скорость и направление его в соответствующем направлении, он будет совершать периодическое движение вокруг шара для боулинга (если игнорировать действие сил трения), т. е. фактически «войдет на орбиту». Наш язык способствует применению этой аналогии к гравитации.

Солнце, подобно шару для боулинга, искривляет структуру окружающего его пространства, а движение Земли, как и движение шарика, определяется этой кривизной. Если скорость и направление движения Земли имеют подходящие значения, она, подобно шару, будет вращаться вокруг Солнца. Это влияние кривизны на движение Земли, показанное на рис. 3.5, и есть то, что мы обычно называем гравитационным воздействием Солнца. Разница состоит в том, что в отличие от Ньютона Эйнштейн указал *механизм*, с помощью которого действует гравитация. Этим механизмом является кривизна пространства. С позиций Эйнштейна, гравитационная привязь, удерживающая Землю на орбите, не связана с каким-то мистическим мгновенным воздействием, оказыва-

мым Солнцем; на самом деле это кривизна структуры пространства, вызванная присутствием Солнца.

Такая картина позволяет по-новому взглянуть на две важные особенности гравитации. Во-первых, чем массивнее будет шар для бублинга, тем сильнее он будет деформировать пленку. Так же и в эйнштейновской модели гравитации — чем массивнее объект, тем более сильно он искривляет окружающее пространство. Это означает, в точном соответствии с экспериментальными фактами, что чем массивнее объект, тем сильнее его гравитационное воздействие на другие тела. Во-вторых, так же как деформация резиновой пленки, вызванная шаром для бублинга, становится все меньше по мере удаления от шара, так и кривизна пространства, созданная присутствием массивного тела, уменьшается при увеличении расстояния от него. Это опять же согласуется с нашим пониманием гравитации, которая ослабевает при увеличении расстояния между объектами.

Здесь важно помнить, что шарик сам искривляет резиновую пленку, хотя и слабо. Земля, которая сама является массивным телом, тоже искривляет пространство, хотя и в гораздо меньшей степени, чем Солнце. Это объясняет с позиций общей теории относительности то, почему Земля удерживается на орбите Луны, а также не дает нам с вами улечь в космическое пространство. Когда парашютист совершает свой прыжок, он скользит вниз по впадине в пространстве, образовавшейся под действием массы Земли. Более того, каждый из нас, как и любое массивное тело, также искривляет пространство вблизи своего тела, хотя из-за относительной малости массы человеческого тела эти впадины очень малы.

В заключение заметим, что Эйнштейн был полностью согласен с утверждением Ньютона: «Гравитация должна передаваться каким-то посредником», и принял вызов Ньютона, который оставил определение этого посредника «на усмотрение моих читателей». Согласно Эйнштейну, посредником гравитации является структура пространства.

Некоторые замечания

Аналогия с резиновой пленкой и шаром для бублинга полезна, поскольку она дает наглядный образ, с помощью которого можно реально понять, что означает искривление пространственной структуры Вселенной. Физики часто используют эту и другие подобные ей аналогии для выработки интуитивных представлений о гравитации и кривизне пространства. Однако, несмотря на полезность, аналогия с резиновой пленкой и шаром для бублинга несовершенна, и мы хотим для полной ясности привлечь внимание читателя к некоторым ее недостаткам.

Во-первых, когда Солнце вызывает искривление структуры пространства, это не связано с тем, что оно «тянет пространство вниз» в результате действия силы тяжести, как это происходит в случае с шаром для бублинга. В случае с Солнцем здесь нет других объектов, которые «тянут пространство». Напротив, как учит Эйнштейн, *кривизна пространства и есть тяготение*. Пространство реагирует искривлением на присутствие объекта, имеющего массу. Аналогично, Земля остается на орбите не потому, что гравитационное притяжение какого-то другого внешнего тела направляет ее по ложбине в искривленной структуре пространства, как это происходит с шариком на искривленной резиновой пленке. Как показал Эйнштейн, тела движутся в пространстве (или, точнее, в пространстве-времени) по кратчайшим возможным путям — «по наиболее легким путям» или, иными словами, «по путям наименьшего сопротивления». Если пространство искривлено, такие пути тоже будут искривленными. Таким образом, хотя модель, состоящая из резиновой пленки и шара для бублинга, дает хорошую наглядную аналогию, показывающую, как объекты, подобные Солнцу, искривляют пространство вокруг себя и тем самым оказывают влияние на движение других тел, физический механизм этих деформаций совершенно иной. Модель обращается к нашей интуиции в рамках традиционных ньютоновских представлений, тогда как для объяснения механизма используется понятие кривизны пространства. Второй

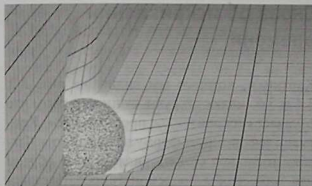


Рис. 3.6. Пример искривленного трехмерного пространства, окружающего Солнце

недостаток этой аналогии связан с тем, что пленка является двумерной. На самом деле Солнце (как и все другие массивные тела) искривляет окружающее их трехмерное пространство, но это труднее наглядно представить. На рис. 3.6 сделана попытка изобразить это. *Все* пространство, окружающее Солнце, «снизу», «с боков» и «сверху» подвергается деформации, и на рис. 3.6 схематически показана часть такого искривленного пространства. Тело, подобное Земле, движется *сквозь* трехмерное пространство, искривленное в результате присутствия Солнца. При взгляде на рисунок у вас могут возникнуть вопросы, — например, почему Земля не удерживается о «вертикальную часть» показанного на нем искривленного пространства? Следует, однако, иметь в виду, что пространство, в отличие от резиновой пленки, не образует сплошного барьера. Криволинейная сетка, показанная на рисунке, представляет собой всего лишь набор сечений трехмерного искривленного пространства, в которое Земля, мы с вами и все остальное погружены, и в котором все это свободно движется. Возможно, вам покажется, что это еще более усложняет картину; у вас может возникнуть вопрос: почему мы *не ощущаем* пространства, если погружены в его структуру? Но мы ощущаем его. Мы ощущаем силу тяжести, а пространство представляет собой среду, которая передает гравитационное воздействие. Выдающийся физик Джон Уилер часто говорил, описывая гравитацию, что «масса управляет пространством, говоря ему, как искривляться, а пространство управляет массой, говоря ей, как двигаться»⁸⁾.

Третьим недостатком этой аналогии является то, что мы игнорировали временное измерение. Мы сделали это для большей наглядности: хотя специальная теория относительности и провозглашает, что мы должны рассматривать временное измерение наравне с пространственными, «увидеть» время значительно сложнее. Однако, как видно из примера с attraction *Верхом на торнадо*, ускорение и, следовательно, гравитация, искривляют *и пространство, и время*. (В действительности, использование математического аппарата общей теории относительности показывает, что при относительно медленном движении тел, например, при вращении планеты вокруг обычной звезды, подобной Солнцу, искривление времени на самом деле оказывает гораздо меньшее влияние на движение планеты, чем искривление пространства.) Мы вернемся к обсуждению искривления времени позже.

Если вы будете помнить об этих трех важных замечаниях, то использование наглядной модели, состоящей из резиновой пленки и шара для бублинга, в качестве интуитивного обобщения предложенного Эйнштейном нового взгляда на гравитацию, является вполне приемлемым.

Разрешение противоречия

Введя пространство и время в качестве динамических объектов, Эйнштейн создал ясный концептуальный образ того, как устроено тяготение. Главная проблема, однако, состоит в том, разрешает ли новая формулировка гравитационного взаимодействия то противоречие со специальной теорией относительности, которым страдала теория тяготения Ньютона. Да, разрешает. И снова аналогия с резиновой пленкой поможет понять основную идею. Представим себе, что у нас есть шарик, который катится по прямой линии по поверхности плоской пленки в отсутствие шара для бублинга. Если поместить шар для бублинга на пленку, движение шарика изменится, но *не мгновенно*. Если бы мы сняли эту последовательность событий на видеопленку и просмотрели ее в замедленном темпе,

мы бы увидели, что возмущение, вызванное появлением шара для боулинга, распространяется подобно волнам в пруду и, в конце концов, достигает места, в котором находится шарик. Спустя короткое время переходные колебания резиновой пленки затухнут, и она перейдет в стационарное искривленное состояние.

То же самое справедливо и для структуры пространства. При отсутствии масс пространство является плоским, и небольшое тело будет находиться в состоянии безмятежного покоя или двигаться с постоянной скоростью. Когда на сцене появляется большая масса, пространство искривляется, — но, как и в случае с пленкой, деформация не будет мгновенной. Она будет распространяться в стороны от массивного тела и, в конце концов, придет в установившееся состояние, передающее гравитационное притяжение нового тела. В нашей аналогии возмущение распространяется по резиновой пленке со скоростью, зависящей от характеристик материала, из которого изготовлена пленка. Эйнштейн сумел рассчитать скорость, с которой распространяется возмущение структуры Вселенной в реальных условиях. Оказалось, что она в точности равна скорости света. Это означает, например, что в рассмотренном выше гипотетическом примере, когда гибель Солнца оказывает влияние на судьбу Земли ввиду изменения их взаимного гравитационного притяжения, это влияние не будет мгновенным. Когда тело изменяет свое положение или даже взрывается, оно вызывает изменение в деформированном состоянии структуры пространства-времени, которое распространяется во все стороны со скоростью света, в полном соответствии с устанавливаемым специальной теорией относительности пределом для космических скоростей. Таким образом, мы на Земле увидим гибель Солнца в тот самый момент, когда ошущим изменения гравитационного притяжения спустя примерно восемь минут после взрыва Солнца. Тем самым формулировка Эйнштейна разрешает конфликт — гравитационные возмущения не отстает от фотонов, но и не опережает их.

Снова об искривлении времени

Картинки, которые мы видим на рис. 3.2, 3.4 и 3.6, иллюстрируют сущность того, что означает «искривленное пространство». Кривизна деформирует форму пространства. Физики пытались создать аналогичные образы для того, чтобы продемонстрировать смысл «искривленного времени», но они оказались гораздо сложнее для восприятия, поэтому мы не будем их здесь приводить. Вместо этого последуем примеру Слима и Джима из аттракциона *Верхом на торнадо* и попытаемся осознать ощущение искривленности времени, обусловленной гравитацией.

Для этого снова посетим Джорджа и Грейс, которые находятся уже не во мраке пустого космического пространства, а где-то на окраине Солнечной системы. Оба они все еще носят на своих скафандрах большие цифровые часы, которые мы когда-то синхронизировали. Для простоты не станем учитывать влияние планет и будем рассматривать только гравитационное поле Солнца. Далее, представим себе, что космический корабль, зависший около Джорджа и Грейс, размотал длинный трос, конец которого достигает окрестностей солнечной поверхности. С помощью этого троса Джордж медленно перебирается ближе к Солнцу. По пути он периодически останавливается, чтобы сравнить темп хода времени на его часах и на часах Грейс. Искривление времени, предсказываемое общей теорией относительности Эйнштейна, означает, что по мере того, как он будет испытывать все более сильное воздействие гравитационного поля, его часы будут все больше отставать от часов Грейс. Иными словами, чем ближе он будет к Солнцу, тем медленнее будут идти его часы. Именно в этом смысле гравитация деформирует не только пространство, но и время.

Мы должны были заметить, что в отличие от случая, рассмотренного в главе 2, когда Джордж и Грейс находились в пустом пространстве, перемещаясь относительно друг друга с постоянной скоростью, сейчас между

ними нет симметрии. Джордж, в отличие от Грейс, *ощущает*, что сила тяжести становится все сильнее — ему приходится держаться за трос все крепче, чтобы не лететь Солнцу притянутой себя. Оба согласны с тем, что часы Джорджа идут медленнее. Их точки зрения уже не являются «одинаково равноправными», что позволяло им обмениваться ролями и менять выводы на противоположные. На самом деле, ситуация схожа с той, с которой мы столкнулись в главе 2, когда Джордж испытал ускорение, включив ранцевый двигатель для того, чтобы догнать Грейс. Тогда ускорение Джорджа привело к тому, что его часы определенно стали идти медленнее, чем часы Грейс. Поскольку теперь мы знаем, что ощущение ускоренного движения совпадает с ощущением воздействия гравитационной силы, в переходном положении Джорджа, перебирающегося по тросу, действует тот же самый принцип, и мы снова видим, что часы Джорджа и все события в его жизни замедляются по сравнению с ходом времени у Грейс.

В гравитационном поле, подобном тому, которое существует на поверхности радиальной звезды вроде нашего Солнца, замедление темпа хода часов будет небольшим. Если Грейс находится на расстоянии миллиарда километров от Солнца, то когда Джордж будет в нескольких километрах от поверхности нашего светила, темп хода его часов составит примерно 99,9998 % темпа хода часов Грейс. Такое замедление очень мало⁹⁾. Однако если Джордж будет спускаться по тросу, который висит над поверхностью нейтронной звезды, масса которой примерно равна массе Солнца, а плотность вещества превышает солнечную примерно в миллион миллиардов раз, сильное гравитационное поле этой звезды замедлит темп хода его часов до 76 % темпа хода часов Грейс. Еще более сильные гравитационные поля, подобные тем, которые имеют место на внешней поверхности черных дыр (они обсуждаются ниже), могут замедлить ход времени еще сильнее. Более сильные гравитационные поля вызывают более сильное искривление времени.

Экспериментальное подтверждение общей теории относительности

Большинство из тех, кому приходится изучать общую теорию относительности, бывают очарованы ее эстетической привлекательностью. Путем замены холодного, механистического взгляда Ньютона на пространство, время и тяготение на динамическое и геометрическое описание, включающее искривленное пространство-время, Эйнштейн сумел «впести» тяготение в фундаментальную структуру Вселенной. Перестав быть структурой, наложенной дополнительно, гравитация стала неотъемлемой частью Вселенной на ее наиболее фундаментальном уровне. Вдохнув жизнь в пространство и время, позволив им искривляться, деформироваться и покрываться рябью, мы получили то, что обычно называется тяготением.

Если оставить в стороне эстетическое совершенство, конечным подтверждением справедливости физической теории является ее способность объяснять и точно предсказывать физические явления. Теория гравитации Ньютона блестяще выдерживала это испытание с момента ее появления в конце XVII в. и до начала XX столетия. Применительно к подбрасываемым в воздух мячам, телам, падающим с наклонных башен, кометам, кружащимся вокруг Солнца, или планетам, вращающимся по своим орбитам, теория Ньютона всегда давала чрезвычайно точное объяснение всем наблюдениям и предсказаниям, которые бесчисленное количество раз проверялись в самых разных условиях. Как мы уже подчеркивали, причины появления сомнений в этой необычайно успешной с экспериментальной точки зрения теории состояли в том, что согласно ей гравитационное взаимодействие передается мгновенно, а это противоречит специальной теории относительности.

Эффекты специальной теории относительности, имея огромное значение для понимания пространства, времени и движения на самом фундаментальном уровне, остаются чрезвычайно малыми в мире малых скоростей, в котором мы обитаем. Аналогично,

расхождение между общей теорией относительности Эйнштейна — теорией гравитации, совместимой со специальной теорией относительности, — и теорией тяготения Ньютона также чрезвычайно малы в большинстве обычных ситуаций. Это и хорошо, и плохо. Хорошо потому, что любая теория, претендующая на то, чтобы занять место теории тяготения Ньютона, должна полностью согласовываться с ней в тех областях, где теория Ньютона получила экспериментальное подтверждение. Плохо потому, что это затрудняет экспериментальный выбор между двумя теориями. Выявление различий между теориями Эйнштейна и Ньютона требует проведения чрезвычайно точных измерений в экспериментах, которые очень чувствительны к различиям этих двух теорий. Если вы бросите бейсбольный мячик, для предсказания места его приземления могут быть использованы и ньютоновская, и эйнштейновская теории гравитации. Ответы будут разными, но различия будут столь малы, что они лежат за пределами наших возможностей их экспериментального подтверждения. Требуются более тонкие эксперименты, и Эйнштейн предложил один из них¹⁰.

Мы любиме звездами по ночам, но они, конечно, остаются на небе и днем. В это время мы обычно не видим их, потому что их далекие, точечные огни затмеваются светом Солнца. Однако во время солнечных затмений Луна временно заслоняет часть света, идущего от Солнца, и удаленные звезды становятся видимыми и днем. Тем не менее, присутствие Солнца продолжает оказывать влияние на испущенный ими свет. Свет от некоторых отдаленных звезд на своем пути к Земле должен пройти вблизи Солнца. Общая теория относительности Эйнштейна утверждает, что Солнце искривляет пространство и время, и что эта деформация *оказывает влияние на траекторию идущего от звезд света*. В конце концов, фотоны, излученные далекими звездами, путешествуют по Вселенной, и если ее структура искривлена, это окажет влияние на движение фотонов, также как и на движение любого материального тела. Искривление траектории будет максимальным для тех лучей, которые проходят вблизи поверхности Солнца на сво-

ем пути к Земле. Такие лучи обычно полностью затмеваются светом Солнца, но во время солнечных затмений их можно увидеть.

Угол, на который отклоняется луч света, несложно измерить. Отклонение траектории луча приводит к смещению *видимого* положения звезды. Это смещение может быть точно измерено путем сравнения видимого положения звезды по сравнению с ее *истинным* положением, известным по результатам ночных наблюдений звезды (в отсутствие отклоняющего влияния Солнца), полученным с интервалом примерно в полгода до или после затмения, когда Земля находится в противоположном положении. В ноябре 1915 г. Эйнштейн, используя разработанную им новую теорию гравитации для расчета угла, на который должен отклониться луч света от звезды, прошедший рядом с поверхностью Солнца, получил значение 0,00049 градуса (1,75 угловых секунд, где одна угловая секунда равна 1/3 600 градуса). Этот крошечный угол равен углу раствора диафрагмы, сфокусированной на двенадцатиятицентовой монетке в трех километрах от нее. Однако измерение столь малого угла было уже под силу технике тех дней. По просьбе сэра Фрэнка Дайсона, директора Принцевской обсерватории, сэр Артур Эддингтон, известный астроном и секретарь Королевского астрономического общества Англии, организовал экспедицию на остров Принсипе, расположенный у западного побережья Африки, для проверки предсказания Эйнштейна в ходе солнечного затмения, которое должно было произойти 29 мая 1919 г.

6 ноября 1919 г., после пяти месяцев анализа фотографий, сделанных во время затмения на о. Принсипе (а также фотографий того же затмения, сделанных в Собрале в Бразилии второй британской экспедицией, возглавляемой Чарльзом Дэвидсоном и Эндрю Кроммелином), на совместном заседании Королевского научного общества и Королевского астрономического общества было объявлено, что предсказания, сделанные Эйнштейном на основе общей теории относительности, подтвердились. За короткое время весть об этом успехе — революционном пересмотре ранее существовавших понятий пространства и времени — вышла

далеко за пределы научного сообщества, сделав Эйнштейна знаменитым во всем мире. 7 ноября 1919 г. заголовок лондонского Таймс сообщал: «Революция в науке! Новая теория мироздания! Иден Ньютона извергнута!»¹¹. Это было звездным часом Эйнштейна.

За годы, прошедшие со времени этого эксперимента, подтверждение общей теории относительности, сделанное Эддингтоном, неоднократно подвергалось критическому анализу. Многочисленные сложности и тонкости, связанные с измерениями, затрудняют их воспроизведение и ставят под вопрос достоверность первоначальных результатов. Однако за последние 40 лет были выполнены разнообразные эксперименты с использованием последних достижений современной техники. Эти эксперименты предназначались для проверки различных аспектов общей теории относительности. Все предсказания общей теории относительности получили подтверждение. Сегодня не существует сомнений, что модель гравитации, предложенная Эйнштейном, не только совместима со специальной теорией относительности, но и дает более точное совпадение с экспериментальными данными, чем теория Ньютона.

Черные дыры, Большой взрыв и расширение Вселенной

Если эффекты специальной теории относительности становятся наиболее очевидными при больших скоростях движения тел, то общая теория относительности выходит на сцену, когда тела имеют очень большую массу и вызывают сильное искривление пространства и времени. Рассмотрим два примера.

Первым из них является открытие, сделанное во время Первой мировой войны немецким астрономом Карлом Шварцшильдом, когда он, находясь в 1916 г. на русском фронте, в перерывах между расчетом траекторий артиллерийских снарядов знакомился с достижениями Эйнштейна в области гравитации. Удивительно, что спустя всего несколько месяцев после того, как Эйнштейн нанес завершающие мазки на полотно общей теории относительности, Шварцшильд

сумел, используя эту теорию, получить ясную и точную картину того, как искривляются пространство и время в окрестности идеально сферической звезды. Шварцшильд послал полученные им результаты с русского фронта Эйнштейну, который по его поручению представил их Прусской академии.

Помимо подтверждения и математически точного расчета искривления, которое мы схематически показали на рис. 3.5, работа Шварцшильда — известная в настоящее время под названием «решения Шварцшильда» — выявила одно поразительное следствие общей теории относительности. Было показано, что если масса звезды сосредоточена в пределах достаточно малой сферической области (когда отношение массы звезды к ее радиусу не превосходит некоторого критического значения), то результирующее искривление пространства-времени будет столь значительным, что *никакой объект* (включая свет), достаточно приблизившийся к звезде, не сможет ускользнуть из этой гравитационной ловушки. Поскольку даже свет не сможет вырваться из таких «сжатых звезд», первоначально они получили название *темных*, или *замороженных*¹², звезд. Более броское название было предложено годы спустя Джоном Уилером, который назвал их *черными дырами* — черными, потому что они не могут излучать свет, и дырами, потому что любой объект, приблизившийся к ним на слишком малое расстояние, никогда не возвращается назад. Это название прочно закрепилось и устойчиво.

Решение Шварцшильда иллюстрируется на рис. 3.7. Хотя черные дыры известны своей «прожорливостью», тела, которые проходят мимо них на безопасном расстоянии, отклоняются точно так же, как они отклонялись бы под действием обычной звезды, и следуют дальше своим дорожкой. Но тела любой природы, подошедшие слишком близко, ближе, чем на расстояние, которое называется *горизонтом событий* черной дыры, приговорены — они будут неуклонно падать к центру черной дыры, подвергаясь действию все более интенсивных и становя-

¹⁰ Это название принадлежит советским ученым Я. Б. Зельдовичу и И. Д. Новикову. — *Прим. ред.*

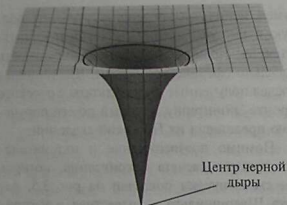


Рис. 3.7. Черная дыра искривляет структуру окружающего пространства-времени настолько сильно, что любой объект, пересекающий ее «горизонт событий» — обозначенный черной окружностью — не может ускользнуть из ее гравитационной ловушки. Никто не знает в точности, что происходит в глубинах черных дыр

шихся, в конце концов, разрушительными гравитационными деформацией. Если, например, вы подплываєте к центру черной дыры ногами вперед, то при пересечении горизонта событий вы будете ощущать растущее чувство дискомфорта. Гравитационное притяжение черной дыры возрастет столь значительно, что оно будет притягивать ваши ноги гораздо сильнее, чем голову (вель ноги будут несколько ближе к центру черной дыры, чем голова), настолько сильно, что сможет быстро разорвать ваше тело на куски.

Если же вы будете благоразумнее в странах в окрестностях черной дыры и позаботитесь о том, чтобы не пересекать ее горизонт событий, то можно использовать черную дыру для замечательного трюка. Представим, например, что вы обнаружили черную дыру, масса которой в 1 000 раз превышает массу Солнца, и спускаетесь на тросе, точно так же, как Джордж спускался на Солнце, до высоты 3 см над горизонтом событий. Как мы уже отмечали, гравитационные поля вызывают искривление времени, это означает, что ваше путешествие во времени замедлится. В действительности, поскольку черные дыры имеют столь сильные гравитационные поля, ход вашего времени замедлится *очень сильно*. Ваши часы будут идти примерно в десять тысяч раз медленнее, чем часы вашего друга, оставшегося на Земле. Если вы провисите над горизонтом

событий черной дыры в таком положении один год, а потом вскарабкаетесь по тросу назад на ожидающий вас неподалеку космический корабль для короткого, но приятного путешествия домой, то по возвращении вы обнаружите, что с момента вашего отбытия прошло более десяти тысяч лет. Вы можете использовать черную дыру в качестве своего рода машины времени, которая позволит вам попасть в отдаленное будущее Земли.

Чтобы почувствовать всю грандиозность масштабов этих явлений, отметим, что звезда массой, равной массе Солнца, станет черной дырой, если ее радиус будет составлять не наблюдаемое значение (около 700 000 км), а всего лишь около 3 км. Вообразите, что все наше Солнце сжалось до размеров Манхэттена. Чайная ложка вещества такого сжатого Солнца будет весить столько же, сколько гора Эверест. Чтобы сделать черной дырой нашу Землю, мы должны сжать ее в шарик радиусом менее сантиметра. В течение долгого времени физики скептически отнеслись к возможности существования таких экстремальных состояний материи, многие из них считали, что черные дыры являются всего лишь издержками разгулявшегося воображения перетрудившихся теоретиков.

Однако в течение последнего десятилетия накопилось достаточно много наблюдательных данных, подтверждающих существование черных дыр. Конечно, поскольку они являются черными, их нельзя наблюдать непосредственно, исследуя небосвод с помощью телескопа. Вместо этого астрономы пытаются обнаружить черные дыры по аномальному поведению обычных излучающих свет звезд, расположенных поблизости от горизонтов событий черных дыр. Например, когда частицы пыли и газа из внешних слоев находящихся по соседству с черной дырой обычных звезд устремятся в направлении горизонта событий черной дыры, они разгонятся почти до световой скорости. При таких скоростях трение в газопылевом водовороте засасываемого вещества приводит к выделению огромного количества тепла, заставляющего газопылевую смесь светиться, излучая обычный видимый свет и рентгеновское излучение. Поскольку это излучение генерируется вне горизонта событий,

оно может избежать попадания в черную дыру. Это излучение распространяется в пространстве, оно может непосредственно наблюдаться и изучаться. Общая теория относительности детально предсказывает характеристики такого рентгеновского излучения; наблюдение этих предсказанных характеристик дает убедительные, хотя и косвенные подтверждения существования черных дыр. Например, имеется все больше свидетельств в пользу того, что очень массивная черная дыра, масса которой в два с половиной миллиона раз превосходит массу нашего Солнца, расположена в центре нашей Галактики. Но даже эти прожорливые черные дыры бледнеют по сравнению с теми, которые, по мнению астрономов, расположены в центрах рассеянных по всему космосу сияющих ошеломляюще ярким светом квазаров. Это черные дыры, массы которых в *миллиарды* раз превосходят массу Солнца.

Шварцшильд умер всего через несколько месяцев после того, как нашел свое решение. Он умер от кожного заболевания, которое заразился на русском фронте. Ему было 42 года. Его трагически краткое знакомство с теорией гравитации Эйнштейна открыло одну из наиболее ярких и таинственных граней жизни Вселенной.

Второй пример, который позволил общей теории относительности нарастить массу, относится к возникновению и эволюции всей Вселенной. Как мы уже видели, Эйнштейн показал, что пространство и время реагируют на присутствие массы и энергии. Эта деформация пространства-времени оказывает влияние на движение других космических тел, оказавшихся поблизости от образованвшегося искривления. Точная траектория движения этих тел зависит от их собственных массы и энергии, которые, в свою очередь, оказывают влияние на кривизну пространства-времени, влияющую на движение этих тел, и так до бесконечности. Используя уравнения общей теории относительности, основанные на достижениях в описании геометрии искривленного пространства, которых добился великий математик XIX в. Георг Бернхард Риман (подробнее мы расскажем о нем ниже), Эйнштейн сумел количественно описать

взаимную эволюцию пространства, времени и материи. К его великому изумлению, применение этих уравнений не к изолированной системе (такой, как планета или комета, обращающаяся вокруг Солнца), а к Вселенной в целом, привело к поразительному выводу: *общий пространственный размер Вселенной должен изменяться с течением времени*. Иными словами, Вселенная либо расширяется, либо сжимается, но никогда не остается в неизменном состоянии. И это явственно следовало из уравнений общей теории относительности.

Это было слишком даже для Эйнштейна. Такой вывод опрокидывал общепринятые интуитивные представления о сущности пространства и времени, сформировавшиеся в течение тысяч лет под влиянием повседневного опыта. Даже такой радикальный мыслитель не смог отказаться от представлений о вечно существующей и неизменной Вселенной. По этой причине Эйнштейн пересмотрел свои уравнения и модифицировал их, добавив дополнительный член, ставший известным как *космологическая постоянная*, который позволял избежать такого вывода и возвращал нас в комфортные условия статической Вселенной. Однако 12 лет спустя, проводя тщательные наблюдения за отдаленными галактиками, американский астроном Эдвин Хаббл экспериментально установил, что Вселенная *расширяется*. История, закрепленная ныне в анналах науки, свидетельствует о том, что Эйнштейн вернул первоначальную форму своим уравнениям, признав их временную модификацию величайшим заблуждением в своей жизни⁽²⁾. Теория Эйнштейна предсказывает расширение Вселенной, вопреки первоначальному нежеланию ее автора принять это вывод. На самом деле, в начале 1920-х гг., за несколько лет до наблюдений Хаббла, русский метеоролог Александр Фридман, используя уравнение Эйнштейна, детально продемонстрировал, что все галактики переносятся в субстрате расширяющегося пространства, быстро удаляясь друг от друга. Наблюдения Хаббла и многочисленные данные, накопленные впоследствии, полностью подтвердили это потрясающее следствие общей теории относительности. Предложив объясне-

ние расширения Вселенной, Эйнштейн совершил один из величайших интеллектуальных подвигов всех времен.

Если принять, что пространство Вселенной расширяется, привола к увеличению расстояния между галактиками, переносимыми космическими потоками, можно мысленно обратить развитие Вселенной вспять по времени, чтобы исследовать ее происхождение. При таком обращении пространство Вселенной сокращается, и галактики становятся все ближе и ближе друг к другу. По мере того, как сокращающаяся Вселенная сжимает галактики, в ней, как в автоклаве, происходит резкое увеличение температуры, звезды разрушаются, и образуется раскаленная плазма из элементарных составляющих вещества. Дальнейшее сжатие сопровождается непрекращающимся ростом температуры, а также плотности первичной плазмы. Если мы представим, что часы отсчитали примерно пятнадцать миллиардов лет назад от современного состояния, известная нам Вселенная сократится до еще меньшего размера. Материя, из которой состоит *все*: каждый автомобиль, каждое здание, каждая гора на Земле, сама Земля, Луна, Сатурн, Юпитер и все другие планеты, Солнце и все другие звезды Млечного пути, галактика Андромеда с ее 100 миллиардами звезд и все остальные 100 миллиардов галактик — все это сожмется в космических тисках до чудовищной плотности. А когда часы покажут еще более раннее время, весь космос сожмется до размеров апельсина, лимона, горошины, песчинки и даже до еще более крошечного размера. Если экстраполировать весь этот путь назад, к «началу всех начал», можно прийти к выводу, что Вселенная должна была возникнуть как *точка* (образ, который мы подвергнем критическому анализу в последующих главах), в которой все вещество и вся энергия были спрессованы до невообразимых плотностей и температуры. Считается, что огненный шар, выравнявшийся из этой гремучей смеси в результате Большого взрыва, исторг семена, из которых в дальнейшем развилась известная нам Вселенная.

Образ Большого взрыва как космической вспышки, извергнувшей материальное содержимое Вселенной, как шрапнель из разо-

рвавшейся бомбы, полезен для восприятия, но он может ввести в заблуждение. Когда взрывается бомба, она взрывается в определенном месте *в пространстве* и в определенный момент *времени*. Ее содержимое выбрасывается в окружающее пространство. При прокручивании вспять эволюции Вселенной, ее материя сжималась потому, что сокращалась *все пространство*. Размер апельсина, размер горошины, размер песчинки — обратная эволюция размеров относится *ко всей* Вселенной, а не к чему-то внутри Вселенной. Следуя вспять все ближе к началу, мы не найдем никакого пространства вне точечной гранаты. Большой взрыв представлял собой извержение сжатого пространства, развертывание которого, подобно приливной волне, и по сей день несет с собой материю и энергию.

Верна ли общая теория относительности?

В экспериментах, выполненных с использованием современной техники, не было обнаружено отклонений от предсказаний общей теории относительности. Только время сможет показать, позволит ли возрастающая точность экспериментов выявить какие-либо отклонения и, тем самым, показать, что эта теория также представляет собой лишь приближенное описание сущности мироздания. Систематическая проверка теорий со все более высокой степенью точности является, конечно, одним из путей развития науки, но это не единственный путь. На самом деле мы уже видели это: поиск новой теории гравитации был инициирован не экспериментальным опровержением теории Ньютона, а конфликтом между ньютоновской гравитацией и другой *теорией* — специальной теорией относительности. Только после появления общей теории относительности (как конкурирующей теории) были установлены экспериментальные изъяны в теории Ньютона, которые проявлялись в ничтожных, но поддающихся измерению расхождениях между двумя теориями. Таким образом, внутренние теоретические противоречия могут

быть такой же движущей силой прогресса, как и экспериментальные данные.

За последние полвека физики столкнулись с другим теоретическим противоречием, не уступающим противоречию между специальной теорией относительности и ньютоновской гравитацией. Выяснилось, что общая теория относительности, по-видимому, на фундаментальном уровне несовместима с другой чрезвычайно тщательно проверенной теорией — *квантовой механикой*. Применительно к вопросам, рассмотренным в данной главе, это противоречие не позволяет физикам прийти к пониманию того, что на самом деле происходит с простран-

ством, временем и материей, когда они находятся в спрессованном состоянии, подобном состоянию в момент Большого взрыва или в центре черной дыры. В более общем плане, это противоречие предупреждает нас об отсутствии некоторого фундаментального звена в нашем понимании природы. Разрешить это противоречие не смогли величайшие физики-теоретики, и оно завоевало вполне заслуженную репутацию *центральной* проблемы современной теоретической физики. Понимание сущности этого противоречия требует знания некоторых основных положений квантовой теории, к которым мы сейчас и перейдем.

Глава 4

Микроскопические странности

Слегка утомившиеся после своей последней экспедиции за пределы Солнечной системы, Джордж и Грейс вернулись на Землю и решили заглянуть в Н-бар³⁾, чтобы немного освежиться после пребывания в космосе. Джордж, как обычно, заказал сок папайи со льдом для себя и водку с тоником для Грейс, откинулся на спинку кресла, скрестил руки за головой и приготовился наслаждаться сигарой, которую он только что зажег. Собравшись затнаться, он вдруг с изумлением обнаружил, что сигара, которая только что была между его зубами, исчезла. Решив, что сигара могла как-нибудь выскользнуть у него из рта, Джордж наклонился вперед, ожидая увидеть дырку, прожевленную на рубашке или на брюках. Но дырки не было. Сигары не было тоже. Грейс, озадаченная странными движениями Джорджа, отгляделась вокруг и увидела, что сигара лежит на стойке прямо за стулом Джорджа. «Странно, — сказал Джордж, — как, черт возьми, могла она туда попасть? Такое чувство, что она прошла прямо сквозь мою голову — но язык не обожжен, и я не чувствую в себе никаких новых дырок». Грейс осмотрела Джорджа и неохотно подтвердила, что его язык и голова выглядят совершенно нормально. Поскольку тут как раз подоспели напитки, Джордж и Грейс пожали плечами и отнесли пропавшую сигару к одной из маленьких тайн жизни. Однако чудеса в Н-баре на этом не закончились.

Джордж бросил взгляд на бокал с соком папайи и увидел, что кубики со льдом находятся в непрерывном движении, постоянно сталкиваясь друг с другом и со стенками бокала, как маленькие автомобили в детском аттракционе. На этот раз удивлен был

не он один. Грейс держала в руках свой бокал, который был раза в два меньше, чем у Джорджа, и оба они увидели, что ее кубики льда кружились еще более неистово. Они с трудом могли различить отдельные кубики, которые сливались в одну ледяную массу. Но это было ничто по сравнению с тем, что случилось в следующее мгновение. Глядя изумленными глазами на напитки, совершающие стремительную пляску, они вдруг заметили, как один кубик льда *прошел сквозь* стенку бокала и упал на стойку. Они схватили бокал и увидели, что он совершенно цел; кубик льда каким-то таинственным образом прошел сквозь стекло, не вызвав никаких повреждений. «Должно быть, галлюцинации после прогулок по открытому космосу», — заметил Джордж. Они остановили бешеную пляску ледяных кубиков, осушив одним глотком свои бокалы, и отправились восстанавливаться домой. Торопясь покинуть заведение, Джордж и Грейс даже не заметили, что по ошибке вышли не через обычную дверь, а через декоративную, нарисованную на стене. Однако персонал Н-бара, давно привыкший к людям, проходящим сквозь стены, даже не заметил их поспешного ухода.

Столетие назад, в то время, когда Конрад и Фрейд исследовали потемки человеческой души, немецкий физик Макс Планк впервые пролил свет на квантовую механику — систему понятий, которая провозглашает, помимо всего прочего, что то, с чем сталкиваются Джордж и Грейс в Н-баре (если это происходит в микромире), вовсе не требует для своего объяснения привлечения потусторонних сил. Столь необычные и причудливые события типичны для поведения нашей Вселенной, рассматриваемой на сверхмалых масштабах.

Квантовая теория

Квантовая механика представляет собой систему понятий, предназначенную для понимания свойств микромира. Точно так же, как специальная и общая теории относительности потребовали решительного пересмотра нашего взгляда на мир для случая объектов, которые движутся очень быстро или имеют очень большую массу, квантовая механика установила, что наша Вселенная имеет такие же, если не еще более поразительные свойства, если исследовать ее в масштабе атомных и субатомных расстояний. В 1965 г. Ричард Фейнман, один из величайших специалистов в области квантовой механики, писал: «Было время, когда газеты сообщали, что только двенадцать человек понимают теорию относительности. Я не верю, что такое время когда-либо было. Могло быть время, когда ее понимал только один человек, тот самый парень, который схватил ее суть перед тем, как написать свою статью. Но после того как люди прочитали его статью, масса людей стала так или иначе понимать теорию относительности, и уж точно число этих людей превышало двенадцать. С другой стороны, я думаю, что могу совершенно спокойно сказать, что квантовую механику не понимает никто»¹⁾.

Хотя Фейнман высказал свою точку зрения более тридцати лет назад, она остается справедливой и сегодня. Он имел в виду следующее: хотя специальная и общая теории относительности потребовали волнующего пересмотра нашего видения мира, после того, как вы полностью примете лежащие в их основе фундаментальные принципы, все новые и необычные следствия этих теорий для пространства и времени могут быть получены непосредственно путем логических рассуждений. Если вы достаточно интенсивно поработаете над выводами Эйнштейна, приведенными в предыдущих двух главах, вы сможете хотя бы на короткое время понять неизбежность сделанных им заключений. Не так обстоит дело с квантовой механикой. Примерно к 1928 г. уже было установлено множество математических формул и законов квантовой механики. Затем с их помощью неоднократно делались самые точ-

ные и успешные в истории науки количественные предсказания. Однако на самом деле те, кто использует квантовую механику, просто следуют формулам и правилам, установленным «отцами-основателями» теории, и четким и недвусмысленным вычислительным процедурам, но без реального понимания того, почему эти процедуры работают, или что они в действительности означают. В отличие от теории относительности едва ли найдется много людей, если такие найдутся вообще, кто смог понять квантовую механику на «интуитивном» уровне.

Что же нам предпринять в такой ситуации? Означает ли это, что в масштабах микромира Вселенная функционирует столь непонятным и непривычным образом, что человеческое мышление, привыкшее в течение тысячелетий иметь дело с явлениями, протекающими в обычном, макроскопическом масштабе, неспособно до конца понять то, что происходит в действительности? Или, быть может, по какой-то исторической случайности, физики создали чрезвычайно уродливую формулировку квантовой механики, которая оказалась успешной с точки зрения количественных предсказаний, но маскирует истинную сущность вещей? Этого не знает никто. Может быть, когда-нибудь в будущем появится более талантливый исследователь, который предложит новую формулировку, ясно отвечающую на все «почему» и «как» квантовой механики. А может и не появится. Единственное, что мы знаем наверняка, это то, что квантовая механика совершенно ясно и недвусмысленно показывает, что ряд фундаментальных концепций, имеющих существенное значение для понимания того мира, с которым мы ныне для понимания той жизни, *настолько теряет всякий смысл* при переходе к микромиру. В результате, пытаясь понять и объяснить Вселенную на атомном и субатомном уровнях, мы должны кардинально менять наш язык и логику рассуждений.

В последующих разделах мы рассмотрим основы этого языка и опишем ряд удивительных результатов, к которым ведет его принятие. Если по ходу изложения квантовая механика покажется вам в целом странной и нелепой, вы должны вспомнить о двух ве-

³⁾ Игра слов: Н-бар (в оригинале *H-Bar*) представляет собой английское чтение символа \hbar , которое обозначает постоянная Планка. — *Прим. перев.*

шах. Во-первых, помимо того, что это математически корректная теория, единственная причина, по которой мы доверяем квантовой механике, состоит в том, что ее предсказания подтверждаются с поразительной точностью. Если кто-то сможет рассказать вам со всеми мучительными подробностями массу самых сокровенных историй из вашего детства, трудно будет не поверить, что это ваш давно пропавший брат (или сестра). Во-вторых, вы не одиноки в такой реакции на квантовую механику. Сходной точки зрения придерживались, в большей или меньшей степени, немало уважаемых физиков. Эйнштейн отказывался признать квантовую механику. И даже Нильс Бор, один из первооткрывателей квантовой механики, однажды заметил, что если вы никогда не чувствуете себя ошеломленным, когда размышляете о квантовой механике, значит, вы не понимаете ее по-настоящему.

На кухне слишком жарко

Путь к квантовой механике начался с одной сбивающей с толку проблемы. Представьте, что стоящая у вас в доме духовка имеет идеальную изоляцию, что вы установили ее на некоторую температуру, скажем, 200° С, и что у вас достаточно времени, чтобы подождать, пока она нагреется. Даже если перед включением духовки вы откачаете из нее весь воздух, она будет излучать волны в результате нагрева стенок. Это тот же вид излучения (теплота и свет являются разновидностями электромагнитных волн), что и излучение поверхности Солнца или раскаленной докрасна железной кофочки.

Проблема состоит в следующем. Электромагнитные волны переносят энергию. Например, жизнь на Земле критически зависит от солнечной энергии, переносимой с Солнца на Землю электромагнитными волнами. В начале XX столетия физики рассчитали общее количество энергии электромагнитного излучения замкнутой полости, находящейся при заданной температуре. Используя хорошо известные методы расчета, они получили нелепый ответ: при любой заданной температуре общая энергия оказывалась бесконечной.

Всем было ясно, что это нонсенс — духовка может дать значительное количество энергии, но уж точно не бесконечное. Для того чтобы понять решение, предложенное Планком, стоит рассмотреть проблему более детально. Оказалось, что когда электромагнитная теория Максвелла применяется для расчета излучения духовки, она показывает, что волны, генерируемые стенками, должны быть такими, чтобы между противоположными стенками укладывалось *целое* число максимумов и минимумов. Несколько примеров показано на рис. 4.1. Физики используют для описания таких волн три понятия: длина волны, частота и амплитуда.

Длина волны, как показано на рис. 4.2, представляет собой расстояние между соседними максимумами или минимумами волны. Чем больше максимумов и минимумов, тем короче длина волны, так как все они должны уместиться между неподвижными стенками печи. *Частота* обозначает число циклов колебаний вверх-вниз, которые волна совершает в течение одной секунды. Частота и длина волны являются взаимосвязанными параметрами: чем больше длина волны, тем меньше частота; чем меньше длина волны, тем больше частота. Чтобы понять, почему это так, представьте себе, что вы задеваете волну, раскачивая один конец длинного каната, другой конец которого привязан к стенке. Для того чтобы получить волну с большой длиной волны, вы лениво помахиваете концом каната вверх и вниз. Частота волн равна числу движений вашей руки за секунду и, следовательно, является очень небольшой. Что-

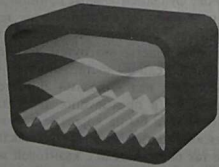


Рис. 4.1. Теория Максвелла говорит нам, что волны излучения в духовке имеют *целое* число максимумов и минимумов — они совершают полные циклы колебаний

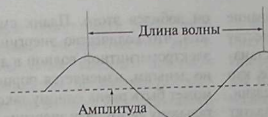


Рис. 4.2. Длина волны определяется как расстояние между соседними максимумами или минимумами. Амплитуда представляет собой наибольшую высоту или глубину волны

бы генерировать более короткую волну, вам придется трести ваш конец более интенсивно, более часто: это даст волну более высокой частоты. Наконец, физики используют термин *амплитуда* для описания максимальной высоты или глубины волны (см. рис. 4.2).

Если электромагнитные волны вам кажутся слишком абстрактными, есть другая хорошая аналогия: волны, воспроизводимые при игре на струнах скрипки. Разные длины волн соответствуют разным музыкальным нотам: чем выше частота, тем выше нота. Амплитуда волны, создаваемой скрипичной струной, определяется тем, с какой силой вы цепляете смычком по струне. При большей силе вы вкладываете больше энергии в колебания струны; следовательно, большее количество энергии соответствует большей амплитуде. Результатом будет более громкий звук. Аналогично меньшее количество энергии соответствует меньшей амплитуде и меньшей громкости звука.

Используя установленные в XIX в. уравнения термодинамики, физики смогли определить, какое количество энергии передают горячие стенки духовки электромагнитным волнам каждой разрешенной длины волны, т.е. фактически насколько сильно стенки «цепляют» каждую волну. Полученный результат оказался весьма простым: каждая из разрешенных волн *независимо от ее длины* волны будет нести одно и то же количество энергии (которое определяется температурой духовки). Иными словами, когда речь идет о количестве переносимой энергии, все возможные волны в духовке оказываются в совершенно равноправном положении.

На первый взгляд мы получили интересный и довольно безобидный результат. Однако это совсем не так. Он провозгласил крах того, что называлось классической физикой. Причина состоит в следующем. Даже

при ограничении, чтобы все волны имели целое число максимумов и минимумов, — что исключает огромное число видов волн, — в печи по-прежнему остается бесконечное количество волн с нарастающим количеством максимумов и минимумов. Поскольку каждая волна несет одно и то же количество энергии, бесконечное число волн будет переносить бесконечное количество энергии. Так на рубеже столетий в бочке меда теоретической физики объявлялась огромная «гаргантюанская» ложка дегтя.

Деление на порции на рубеже веков

В 1900 г. Планк высказал удивительную догадку, позволившую решить эту головоломку и принесящую ему Нобелевскую премию 1918 г. по физике³. Для того чтобы понять решение Планка, представьте себе, что вы вместе с огромной толпой людей, «бесконечной» по количеству, ютитесь в огромном и холодном ангаре, принадлежавшем скаредному домовладельцу. На стенке установлен затейливый цифровой термостат, который регулирует температуру. Узнав, сколько домовладелец требует в уплату за отопление, вы потрясены. Если термостат установлен на 15° С, каждый должен платить домовладельцу по 15 долларов. Если по 16 долларов на 16° С, каждый платит по 16 долларов и т.д. Вы понимаете, что поскольку крошечное помещение арендует бесконечное число стемщиков, как только отопление было включено, домовладелец станет получать бесконечную сумму денег.

Однако, более внимательно прочитав правила оплаты, вы обнаруживаете лазейку. Ваш домовладелец очень занятый человек,

он не хочет терять время на отсчитывание слачи, особенно бесконечному количеству отдельных съемщиков. Поэтому он устанавливает следующую систему оплаты. Те, кто могут выплатить точную сумму без слачи, платят строго по счету. Остальные платят столько, сколько могут набрать имеющимися у них купюрами, но так, чтобы не нужно было давать слачи. Поэтому, желая привлечь к оплате всех и, в то же время, избежать непомерной платы за тепло, вы уговориваете своих компаньонов разделить все деньги по следующему принципу. Один из вас собирает все центы, другой — все пятицентные монеты, третий — все десятицентные, четвертый — все двадцатипятицентные и т. д., включая тех, кто будет хранить однодолларовые банкноты, пятидолларовые, десятидолларовые, двадцатидолларовые, пятидесятидолларовые, стодолларовые и даже банкноты более крупных (и незнакомых) номиналов. Вы нахально устанавливаете термостат на 25° C и ждете появления домовладельца. Когда он приходит, тот компаньон, у которого все центы, платит ему первым, отсчитывая 2500 монеток. Затем хранитель пятицентных монет отдает 500 монет; хранитель десятицентных монет отдает 250 монет, далее платит обладатель 100 двадцатипятицентных монет, затем идет парень с долларами, отдающий домовладельцу 25 бумажек. Далее хранитель пятидолларовых купюр передает 5 банкнот, а хранитель десятидолларовых банкнот ограничивается только 2 банкнотами (поскольку три десятидолларовые банкноты уже превышают сумму, подлежащую уплате, и требуют слачи). Ваш компаньон с купюрами по 20 долларов также ограничивается только 1 банкнотой (ибо с двух уже потребуются слачи), а у всех остальных номиналов имеющихся у них купюр — минимальная порция денег — превышает требуемую к оплате сумму. Поэтому они не могут заплатить домовладельцу, и в результате, вместо того, чтобы получить бесконечную сумму денег, на которую рассчитывал домовладелец, он удаляется с жалкими 190 долларами.

Планк использовал очень похожий подход для того, чтобы обойти абсурдный вывод о бесконечном количестве энергии в духовке и получить конечное значение. Вот как

он добился этого. Планк смело предположил, что количество энергии, переносимой электромагнитной волной в духовке, подобно деньгам, изменяется порциями. Энергия может быть равна одному такому фундаментальному «номиналу энергии», или двум, или трем и т. д. — но это все. Согласно Планку, когда речь идет об энергии, доли не допустимы, точно так же, как вы не можете иметь монету в одну треть цента или в половину от двадцати пяти центов. (В настоящее время денежные номиналы США определяются федеральным казначейством.) В поисках более фундаментального объяснения Планк предположил, что энергетический номинал волны, т. е. минимальное количество энергии, которое она может нести, определяется ее частотой. Точнее, он постулировал, что минимальная энергия, которую может нести волна, пропорциональна ее частоте: большая частота (более короткая длина волны) предполагает большую минимальную энергию, меньшая частота (большая длина волны) — меньшую минимальную энергию. Можно привести такое грубое сравнение: так же, как пологие океанские волны длинны и величественны, а сильные короткие и порывистые, длинноволновое излучение менее энергично, чем коротковолновое.

Расчеты Планка показали, что дискретность допустимой энергии волн избавляет от нелепого результата о бесконечной суммарной энергии. Нетрудно понять, почему это так. Когда духовка нагревается до некоторой заданной температуры, то согласно расчетам, основанным на термодинамике XIX в., каждая волна вносит свой вклад в общую энергию. Однако, подобно компаньонам, которые не могут внести обычную сумму платы домовладельцу, поскольку номинал их денег слишком велик, если минимальная энергия, которую может перенести конкретная волна, превышает ее ожидаемый энергетический вклад, она не дает вклада вообще и остается безучастной. Поскольку минимальная энергия, которую может нести волна, согласно Планку, пропорциональна ее частоте, то, исследуя волны в духовке и переходя к волнам со все более высокой частотой (с все меньшей длиной волны), рано или поздно обнаружится, что минимальная

энергия, которую может нести волна, превышает ожидаемый энергетический вклад. Подобно компаньонам, которым доверили банкноты с номиналом, превышающим двадцать долларов, эти волны с возрастающими частотами не могут дать вклада, которого требует физика XIX в. Аналогично тому, что только конечное число компаньонов смогло заплатить за тепло, и общая сумма оказалась конечной, только конечное число волн может дать вклад в общую энергию печи, что опять же приводит к конечности полного количества энергии. Говорим ли мы об энергии или о деньгах, порционность фундаментальных единиц и все возрастающий размер этих единиц по мере того, как мы переходим к более высоким частотам (или к более крупным купюрам), приводит к zase бесконечного ответа конечным³).

Избавившись от очевидно абсурдного бесконечного результата, Планк сделал важный шаг. Но то, что действительно заставило людей поверить в справедливость его догадки — замечательное совпадение результата его нового подхода для вычисления энергии в духовке с экспериментальными данными. Планк обнаружил, что подстроив *одну* параметр, входящий в его новую расчетную схему, можно точно предсказать результаты измерения энергии в духовке для любой заданной температуры. Этот параметр представлял собой коэффициент пропорциональности между частотой волны и минимальным количеством энергии, которую волна может нести. Планк установил, что этот коэффициент пропорциональности, известный ныне как *постоянная Планка* и обозначаемый символом h , составляет в обычных единицах примерно одну миллиардную от одной миллиардной от одной миллиардной доли⁴). Ничтожно малая величина постоянной Планка означает, что размер порций энергии обычно очень мал. По этой причине нам, например, кажется, что мы заставляем энергию волн, составляемой струной скрипки (и, следовательно, громкость звука), изменяться непрерывно. В действительности, однако, энергия волн изменяется дискретными шагами согласно формуле Планка, но размер этих шагов настолько мал, что дискретные скачки от одного уровня громкости к другому кажут-

ся нам плавными переходами. По утверждению Планка, амплитуда этих скачков энергии растет по мере увеличения частоты волны (сопровождаемого уменьшением длины волны). Это тот основной момент, который разрешает парадокс бесконечной энергии.

Как мы увидим далее, квантовая гипотеза Планка не просто позволяет понять энергетику духовки, но идет гораздо дальше. Она опровергает многое из того, что мы считали само собой разумеющимся. Малое значение постоянной Планка заточает в границы микромира большинство отклонений от привычной картины, но если бы постоянная h была гораздо больше, то происходящие в H -баре странные вещи стали бы обыденными. Как мы увидим, аналоги этих странностей являются привычным делом в микромире.

Что представляют собой порции?

Планк не мог обосновать гипотезу дискретности энергии волн, играющую центральную роль в предложенном им решении. За исключением того, что это работает, и у Планка, ни у кого-либо еще не было никакого рационального объяснения, почему все должно быть именно так. Как заметил однажды физик Георгий Гамов, это подобно тому, как если бы природа разрешила либо пить целый литр пива, либо не пить совсем, не допуская никаких промежуточных доз⁵). В 1905 г. Эйнштейн нашел объяснение, за которое он получил Нобелевскую премию 1921 г. по физике.

Эйнштейн пришел к своему объяснению, пытаясь решить проблему, известную под названием фотоэлектронной эмиссии (фотоэффекта). В 1887 г. немецкий физик Генрих Герц впервые обнаружил, что когда электромагнитное излучение (свет) падает на некоторые металлы, они испускают электроны. Само по себе это свойство не слишком удивительно. Известно, что некоторые из электронов металлов слабо связаны с ядрами атомов (именно поэтому металлы являются

столь хорошими проводниками электричества). Когда свет сталкивается с поверхностью металла, он отдает энергию: при столкновении с вашей кожей это приводит к нагреву тела. Переданная энергия может возбуждать электроны в металлах, при этом некоторые из слабозвязанных электронов могут выбиваться с поверхности.

Странные свойства фотоэффекта становятся явными при более детальном изучении характеристик испускаемых электронов. На первый взгляд может показаться, что при увеличении интенсивности (яркости) света скорость вылетевших электронов также должна увеличиваться, поскольку падающее электромагнитное излучение будет нести больше энергии.

Однако этого не происходит. Вместо этого происходит увеличение числа вылетевших электронов, но их скорость остается постоянной. С другой стороны, было экспериментально установлено, что скорость вылетевших электронов увеличивается при увеличении частоты падающего света и, соответственно, уменьшается при ее уменьшении. (Для электромагнитных волн в видимой части спектра увеличение частоты соответствует изменению цвета от красного к оранжевому, желтому, зеленому, голубому, синему и, наконец, к фиолетовому. Излучение, частота которого превышает частоту фиолетового света, невидимо: эта часть спектра начинается с ультрафиолетового излучения, за которым следует рентгеновское. Электромагнитные волны, частота которых ниже частоты красного света, также невидимы; они соответствуют инфракрасному излучению.) В действительности, при уменьшении частоты света наступает момент, когда скорость вылетевших электронов падает до нуля, и они перестают вылетать с поверхности независимо от интенсивности источника света. По какой-то неизвестной причине цвет падающего луча света, а не его полная энергия, определяет, испускаются ли электроны, и если испускаются, то какую энергию имеют.

Чтобы понять, как Эйнштейн объяснил эти загадочные факты, вернемся к нашему арендуемому помещению, которое теперь нагревается до комфортной темпера-

туры 25° С. Представим, что ненавидящий детей домовладелец потребовал, чтобы все, кому не исполнилось пятнадцати лет, жили в подвале, который взрослые могут видеть с балкона, опоясывающего здание. Более того, любой из огромного количества детей в подвале может выйти из здания, лишь заплатив приватной плату за выход в 85 центов. (Этот домовладелец такой негодяй.) Взрослые, которые согласно вашему предложению распределили все деньги по номиналам в соответствии с описанной выше схемой, могут передать деньги детям, только бросая их с балкона. Давайте посмотрим, что при этом произойдет.

Держать одноцентовых монет бросает несколько из них вниз, но это слишком малая сумма, чтобы кто-то из детей мог заплатить за выход. И, поскольку внизу находится «бесконечное» море детей, с криками сражающихся за падающие монеты, то даже если обладатель центов бросит огромное количество монет, ни один ребенок не сможет собрать 85 центов, которые он должен уплатить. То же самое получится у тех взрослых, которые владеют пятицентовыми, десятицентовыми и двадцатипятицентовыми монетами. Хотя каждый из них бросит вниз огромное количество денег, любой ребенок сойдет за счастье, если ему достанется хотя бы одна монета (большинство же не получит ни одной), и уж точно никто не сможет набрать сумму в 85 центов, необходимой для выхода из подвала. Но когда деньги начнет бросать владелец однодолларовых купюр — даже небольшими суммами, доллар за долларом, — те счастливицы, кому уласть поймать одну единственную банкноту, смогут сразу же покинуть подвал. Обратите внимание, что даже когда этот человек наверху как следует расщепится и начнет бросать доллары бочками, количество выходящих детей увеличится во много раз, но у каждого останется ровно 15 центов после получения сдачи у приватника. Это будет справедливо независимо от числа брошенных долларов.

Рассмотрим теперь, как применить все это к фотоэффекту. Основываясь на рассмотренных выше экспериментальных данных, Эйнштейн решил распространить планковскую дискретную модель энергии волны

на новое определение света. Согласно Эйнштейну, световой луч должен рассматриваться как поток микроскопических частиц света, окрещенных химиком Гильбертом Льюисом фотонами (мы уже использовали этот термин в примере со световыми часами, приведенном в главе 2). Для того чтобы дать представление о масштабах в рамках корпускулярной модели света, скажем, что обычная электрическая лампочка мощностью 100 Вт излучает примерно сто миллиардов миллиардов (10^{20}) фотонов в секунду. Эйнштейн использовал это новое положение для объяснения механизма, лежащего в основе фотоэффекта. Он предположил, что электрон выбивается с поверхности металла, если с ним столкнется фотон, обладающий достаточным количеством энергии. А чем определяется энергия отдельного фотона? Для объяснения экспериментальных данных Эйнштейн вслед за Планком предположил, что энергия каждого фотона пропорциональна частоте световой волны (при этом коэффициент пропорциональности равен постоянной Планка).

Тогда, как и в случае минимальной суммы, необходимой для уплаты за выход ребенка, чтобы вырваться с поверхности, электроны в металле должны испытать соударение с фотоном, обладающим определенным минимальным количеством энергии. (Как и в случае с детьми, сражающимися за деньги, вероятность того, что отдельно взятый электрон испытает соударение более чем с одним фотоном исчезающе мала — большинство электронов не испытает вообще ни одного соударения.) Однако если частота падающего света слишком мала, энергия составляющих его фотонов будет недостаточной, чтобы вырывать электроны. Точно так же, как никто из детей не сможет покинуть подвал, несмотря на огромное количество мелких монет, которые им бросят взрослые, ни один электрон не сможет выйти из металла, несмотря на огромное общее количество энергии, содержащейся в падающем свете, если его частота (и, следовательно, энергия отдельных фотонов) будет слишком низкой.

Но так же, как дети смогут начать покидать подвал, как только номинал бросаемых

им денег станет достаточно большим, электроны начнут вырываться с поверхности металла, как только частота падающего на них света — его энергетический номинал — станет достаточно высокой. Далее, так же, как в случае, когда владелец однодолларовых купюр увеличил общую сумму сбрасываемых денег, увеличив число бросаемых банкнот, интенсивность луча света, имеющего заданную частоту, возрастет при увеличении числа фотонов, которые он содержит. И точно так же, как большее число долларов приведет к тому, что больше детей смогут покинуть подвал, увеличение числа фотонов приведет к тому, что большее число электронов испытает соударение и покинет металл. Обратите внимание, что энергия каждого из этих электронов после выхода из металла зависит исключительно от частоты светового луча, а не от его суммарной интенсивности. Так же, как дети покидают подвал с 15 центами, независимо от того, сколько купюр было брошено им с балкона, каждый электрон покидает поверхность с одной и той же энергией и, следовательно, с одной и той же скоростью, независимо от общей интенсивности падающего света. Большое количество денег просто означает, что большее число детей смогут покинуть подвал; большая суммарная энергия светового луча означает, что больше электронов будет вырвано из металла. Если мы хотим, чтобы дети покидали подвал с большим количеством денег, мы должны увеличить номинал купюр, которые им бросаем; если мы хотим, чтобы электроны выходили из металла с большей скоростью, следует увеличить частоту падающего светового луча, т. е. увеличить энергетический номинал фотонов, которые падают на поверхность металла.

Сказанное полностью подтверждается экспериментальными данными. Частота света (его цвет) определяет скорость вылетающих электронов, суммарная интенсивность света — количество вылетевших электронов. Таким образом, Эйнштейн показал, что гипотеза Планка о дискретности энергии на самом деле отражает фундаментальное свойство электромагнитных волн: они состоят из частиц — фотонов, которые представляют собой маленькие порции или кванты

света. Дискретность энергии, заключенной в таких волнах, связана с тем, что они состоят из дискретных объектов.

Прозрение Эйнштейна представляло собой большой шаг вперед. Но, как мы увидим ниже, история была не такой гладкой, как может показаться.

Волна или частица?

Каждому известно, что вода (и, следовательно, волны на поверхности воды) состоит из огромного количества молекул. Поэтому так ли удивительно, что световые волны тоже состоят из огромного числа частиц — фотонов? Удивительно. Но главный сюрприз кроется в деталях. Дело в том, что более трехсот лет назад Ньютон провозгласил, что свет представляет собой поток частиц, так что сама идея не нова. Однако ряд коллег Ньютона, среди которых наиболее выделялся голландский физик Христиан Гюйгенс, оспорили это мнение, утверждая, что свет представляет собой волну. Долгое время этот вопрос был предметом ожесточенных дебатов, пока эксперименты, выполненные в начале XIX в. английским физиком Томасом Юнгом, не показали, что Ньютон ошибался.

Вариант установки в эксперименте Юнга, известном под названием опыта с двумя щелями, схематически показан на рис. 4.3. Фейнман любил говорить, что вся квантовая механика может быть выведена путем тщательного осмысления следствий одного этого эксперимента, поэтому он заслуживает того, чтобы рассмотреть его поподробнее. Как видно из рис. 4.3, свет падает на сплошную преграду, в которой сделаны две щели. Свет, который прошел через щели, регистрируется на фотопластинке — более светлые области на фотографии указывают на те места, куда попало больше света. Эксперимент состоит в сравнении картин, полученных на фотопластинках, когда открыты одна или обе щели и включен источник света.

Если левая щель закрыта, а правая открыта, фотография будет выглядеть, как показано на рис. 4.4. Картина вполне объ-

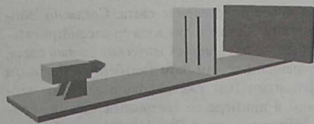


Рис. 4.3. В эксперименте с двумя щелями луч света падает на преграду, в которой проделаны две щели. Когда открыта одна или обе щели, луч света, проходящий через преграду, регистрируется с помощью фотопластинки

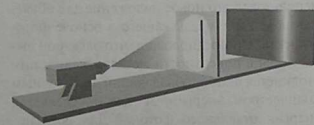


Рис. 4.4. В этом опыте открыта правая щель, в результате изображение на фотопластинке будет выглядеть, как показано на рисунке

яснима, поскольку свет, который попадает на фотопластинку, проходит только через одну щель и поэтому концентрируется в правой части фотографии. Аналогично, если мы закроем правую щель, а левую оставим открытой, фотография будет выглядеть, как показано на рис. 4.5. Если открыты обе щели, то картина, предсказываемая ньютоновской корпускулярной моделью света, должна выглядеть, как показано на рис. 4.6, представляющей собой комбинацию рис. 4.4 и 4.5. По существу, если представить ньютоновские световые корпускулы в виде маленьких дробинок, которыми вы обстреливаете преграду, то те из дробинок, которые пройдут сквозь нее, будут концентрироваться в двух полосках, положение которых соответствует положению щелей. Волновая же модель света, напротив, ведет к совершенно иному предсказанию, если открыты обе щели. Посмотрим, что происходит в этом случае.

Представим, что вместо световых волн мы рассматриваем волны на поверхности воды. Это не повлияет на результат, но такие волны более наглядны. Когда волна сталкивается с преградой, то, как показано на рис. 4.7, от каждой щели распространя-

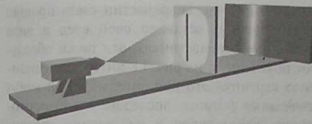


Рис. 4.5. Те же условия, как и в опыте, показанном на рис. 4.4, за исключением того, что открыта левая щель

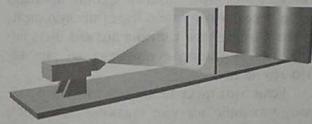


Рис. 4.6. Ньютоновская корпускулярная модель предсказывает, что когда будут открыты обе щели, картина на фотопластинке будет представлять собой объединение картин, показанных на рис. 4.4 и 4.5

ется новая волна, похожая на ту, которая возникает, если бросить камешек в пруд. (Это легко проверить, используя картонный лист с двумя прорезами, помещенный в чашку с водой.) Когда волны, идущие от каждой щели, накладываются друг на друга, происходит интересное явление. При наложении двух волновых максимумов высота волны в соответствующей точке увеличивается — она равна сумме высот максимумов двух наложившихся волн. Аналогично, при наложении двух минимумов глубина впадины, образовавшейся в этой точке, также увеличивается. Наконец, если мак-

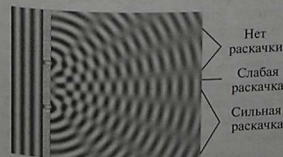


Рис. 4.7. Круговые волны на воде, идущие от каждой щели, накладываются одна на другую; это приводит к тому, что в одних местах результирующая волна будет усиливаться, а в других ослабляться

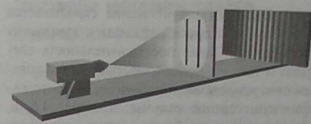


Рис. 4.8. Если свет представляет собой волну, то в тех случаях, когда открыты обе щели, будет происходить интерференция между волнами, прошедшими через разные щели

симум одной волны совпадает с минимумом другой, они *взаимо гасят друг друга*. (На этом основана конструкция фантастических шумопоглощающих наушников — они определяют форму прошедшей звуковой волны и генерируют другую, форму которой в точности «противоположна» первой, что приводит к подавлению нежелательного шума.) Между этими крайними случаями — максимум с максимумом, минимум с минимумом и максимум с минимумом — расположен весь спектр частичного усиления и частичного ослабления. Если вы с компанией друзей сядете в небольшие лодки, выстроите их в линию параллельно преграде и каждый из вас будет соприкасаться, насколько сильно его качает при прохождении волны, результат будет похож на тот, который изображен на рис. 4.7. Точки с сильной качкой будут расположены там, где накладываются максимумы (или минимумы) волн, приходящих от разных щелей. Участки с минимальной качкой или полным ее отсутствием окажутся там, где максимумы волны, идущей от одной щели, будут совпадать с минимумами волны, идущей от другой щели.

Поскольку фотографическая пластинка регистрирует, насколько сильно она «раскачивается» под влиянием падающего света, из приведенных выше рассуждений, примененных к волновой картине, создаваемой лучом света, следует, что когда открыты обе щели, фотография будет иметь вид, показанный на рис. 4.8. Самые яркие участки на рис. 4.8 представляют области, в которых максимумы (или минимумы) световых волн, прошедших от разных щелей, совпадают. Темными являются участки, в кото-

рых максимум одной волны складывается с минимумом другой, приводя к взаимному погашению. Такая последовательность светлых и темных полос известна под названием *интерференционной картины*. Эта фотография существенно отличается от рис. 4.6, и, следовательно, требуется эксперимент, который позволил бы установить, какая из теорий права — корпускулярная или волновая. Подобный эксперимент был выполнен Юнгом, и его результат совпал с картиной, показанной на рис. 4.8, тем самым подтвердив волновую природу света. Ньютоновская теория корпускулярной природы света была отвергнута (хотя потребовалось некоторое время, прежде чем все физики согласились с этим). Доминирующая волновая теория света впоследствии получила надежное математическое обоснование в теории Максвелла.

Но Эйнштейн, нисвергнувший заслуженную теорию гравитации Ньютона, похоже, возродил ньютоновскую корпускулярную модель света, введя понятие фотонов. Конечно, перед нами по-прежнему стоит вопрос: как объяснить интерференционную картину, показанную на рис. 4.8, с точки зрения корпускулярной теории? На первый взгляд можно предложить следующее объяснение. Вода состоит из молекул H_2O — «частиц» воды. Однако когда огромное количество этих молекул движется в одном потоке, они могут создавать волны на поверхности воды, с помощью этими волнам интерференционными свойствами, показанными на рис. 4.7. Можно предположить, что в корпускулярной модели света волновые эффекты, например, интерференционные картины, возникают благодаря взаимодействию огромного числа световых корпускул — фотонов.

В действительности, однако, микромир устроен гораздо более тонко. Даже если интенсивность источника света на рис. 4.8 начнет уменьшаться вплоть до такого значения, когда в сторону преграды *один за другим* будут излучаться одиночные фотоны со скоростью, скажем, один фотон в десять секунд, результат на фотопластинке будет выглядеть точно так же, как показано на рис. 4.8. Если вы подождете достаточно долго, чтобы огромное

число этих отдельных частиц света прошло через щели и оставило свой след в виде точек на фотопластинках, эти точки образуют показанную на рис. 4.8 интерференционную картину. Это поразительно. Как могут отдельные фотоны, последовательно проходящие через экран и независимо сталкивающиеся с фотопластинкой, «говориться» и воспроизвести яркие и темные полосы интерференционной картины? Здравый смысл говорит нам, что каждый фотон проходит либо через левую, либо через правую щель, и результирующая картина должна быть похожа на ту, которая показана на рис. 4.6. Но это не так.

Если этот факт не поразил вас, это значит, что либо вы уже сталкивались с ним и знаете его объяснение, либо наше описание является недостаточным наглядным. Если дело в последнем, попробуем взглянуть на это явление еще раз, но под несколько иным углом зрения. Итак, вы закрываете левую щель и пускаете фотоны на преграду, один за другим. Некоторые из них проходят через преграду, некоторые нет. Те, которые прошли, точка за точкой создают изображение на фотопластинке, которое выглядит, как показано на рис. 4.4. Вслед за этим вы проводите эксперимент с новой фотопластинкой, но на этот раз открываете обе щели. Как и следовало ожидать, вы считаете, что это только увеличит число фотонов, прошедших через преграду и попавших на фотопластинку, т. е. на пластинку попадет больше света, чем в первом опыте. Но когда позднее вы изучаете полученную фотографию, вы видите, что наряду с участками, которые были темными в первом опыте и стали светлыми во втором, есть участки, которые были светлыми в первом опыте, а во втором стали темными, как на рис. 4.8. Увеличив число фотонов, попавших на фотопластинку, вы уменьшили яркость некоторых участков. Каким-то образом отдельные фотоны, разделенные во времени, смогли нейтрализовать друг друга. Подумайте о всей неординарности того, что произошло: фотоны, которые прошли через правую щель и попали на пленку в одной из темных полос на рис. 4.8, не смогли сделать этого при открытой левой

щели (поэтому пленка и осталась темной). Но как могла повлиять на крошечную частицу света, прошедшую через одну щель, обстоятельство, была ли открыта *другая* щель? Фейнман однажды заметил, что это так же странно, как если бы вы стреляли по экрану из пулемета, и когда были открыты обе щели, то отдельные, независимо вылетевшие пули каким-то образом нейтрализовали друг друга, оставляя непораженные участки на экране — участки, которые *были поражены*, когда открытой была только одна щель.

Эти эксперименты показали, что частицы света Эйнштейна довольно существенно отличаются от частиц Ньютона. Каким-то образом фотоны — хотя они и являются частицами — обладают также и волновыми свойствами света. Тот факт, что энергия этих частиц определяется параметром, используемым для описания волн, т. е. частотой, является первым признаком того, что это странное объединение действительно имеет место. Однако фотоэффект и эксперимент с двумя щелями еще более озадачивают нас. Фотоэффект показывает, что свет имеет свойства частиц. Эксперимент с двумя щелями демонстрирует, что свет также проявляет интерференционные свойства, характерные для волн. Вместе они показывают, что свет обладает и *волновыми*, и *корпускулярными свойствами*. Микромир требует, чтобы при попытке его описания мы отказались от наших интуитивных представлений о том, что любой объект представляет собой либо волну, либо частицу, и чтобы мы учитывали возможность того, что он может быть волной и частицей *одновременно*. Это один из тех случаев, когда высказывание Фейнмана о том, что «никто не понимает квантовую механику», является особенно актуальным. Мы можем произносить слова типа «корпускулярно-волновой дуализм». Мы можем преобразовать эти слова в математическую модель, которая воспроизведет экспериментальные данные с поразительной точностью. Но добиться глубокого, интуитивного понимания этой ошеломляющей особенности микромира необычайно трудно.

Частицы материи также являются волнами

В течение первых десятилетий XX в. многие крупнейшие физики-теоретики неустанно трудились над разработкой математически строгой и физически обоснованной теории, объясняющей оставшиеся доселе неизвестными свойства микромира. Так, под руководством Нильса Бора был достигнут значительный прогресс в объяснении свойств света, излучаемого атомами водорода при высокой температуре. Однако эта и другие работы, выполненные до середины 1920-х гг., представляли собой скорее временный союз идей XIX столетия с впервые полученными концепциями квантовой механики, а не гармоничную систему понимания мироздания. По сравнению с ясными и логичными системами ньютоновских законов движения или электромагнитной теории Максвелла, разработанная только частично квантовая механика находилась в хаотическом состоянии.

В 1923 г. молодой французский аристократ, князь Луи де Бройль, добавил новый элемент в квантовую мешанину, который вскоре помог разработать математический аппарат современной квантовой механики и принес ему Нобелевскую премию 1929 г. по физике. Вдохновленный печальной теорией относительности Эйнштейна, де Бройль предположил, что корпускулярно-волновой дуализм применим не только к свету, но и к веществу. Его аргументы, если опустить детали, состоят в том, что эйнштейновское уравнение $E = mc^2$ связывает массу с энергией; но с другой стороны, Планк и Эйнштейн связали энергию с частотой волн. Объединяя эти два факта, можно прийти к выводу, что масса должна быть и волноч. После долгих размышлений де Бройль предположил, что так же, как свет является волновым явлением, которое свет показывает квантовое описание, и имеет равкак показывает квантовое описание, но обоснованное корпускулярное описание, так и электрон, который мы обычно считаем частицей, может иметь равно обоснованное волновое описание. Эйнштейн сразу принял

идею де Бройля, поскольку она была естественным развитием его собственного вклада в теорию относительности и теорию фотонов. Однако без экспериментального подтверждения все равно нельзя было обойтись. Такое подтверждение было вскоре получено в работах Клинтона Дэвиссона и Лестера Джермера.

В середине 1920-х гг. Дэвиссон и Джермер, физики-экспериментаторы из лаборатории телефонной компании *Белл*, исследовали рассеяние электронов на атомах никеля. Для нас их исследования интересны тем, что кристаллы никеля в этих экспериментах действовали во многом подобно щелям в опыте, описанном и проиллюстрированном в предыдущем разделе. На самом деле можно считать эксперименты практически идентичными, за исключением того, что вместо луча света использовался пучок электронов. Дэвиссон и Джермер исследовали электроны, пропуская их через две щели, сквозь которые они могли попадать на фосфоресцирующий экран, оставляя на нем светящиеся точки, точно так же, как на экране телевизора, и обнаружили поразительное явление. На экране появилась картина, очень похожая на ту, которая показана на рис. 4.8. Эксперимент, таким образом, показывал, что электроны создают интерференционную картину, которая является неоспоримым признаком *волн*. В темных точках на фосфоресцирующем экране электроны каким-то образом «нейтрализовали» друг друга, совсем как при наложении гребней и впадин волн, распространяющихся по поверхности волны. Даже если «сжать» пучок электронов до такой степени, что один электрон будет излучаться один раз в десять секунд, отдельные электроны по-прежнему будут образовывать яркие и темные полосы — по одному пятну за один раз. Как и фотоны, отдельные электроны каким-то образом «интерферируют» сами с собой в том смысле, что с течением времени отдельные электроны воссоздают интерференционную картину, которая ассоциируется с волнами.

Мы с неизбежностью вынуждены заключить, что наряду с более привычным описанием на языке частиц каждый электрон проявляет и волновые свойства.

Описанные выше эксперименты относятся к электронам, однако схожие эксперименты позволяют сделать вывод о том, что *все* вещество имеет волновые свойства. Но как это согласуется с нашим повседневным опытом, говорящем о том, что вещество — это нечто сплошное и твердое, и уж никак не похожее на волны? Де Бройль предложил формулу для длины волны частицы вещества, которая показывает, что длина волны пропорциональна постоянной Планка h . (Если говорить более точно, длина волны определяется как частное от деления h на импульс материального тела.) Поскольку величина h очень мала, длина волны также является очень малой по обычным масштабам. Именно по этой причине волновые характеристики материи становятся наблюдаемыми только в высокоточных микроскопических исследованиях. Точно так же, как большая величина скорости света скрывает истинные свойства пространства и времени, малость h маскирует волновые свойства материи в окружающем нас мире.

Волны чего?

Явление интерференции, открытое Дэвиссоном и Джермером, реально продемонстрировало, что электроны подобны волнам. Но при этом возникает естественный вопрос: *волнам чего?* Одно из первых предположений на эту тему, сделанное австрийским физиком Эрвином Шредингером, заключалось в том, что эти волны представляют собой «размазанные» электроны. Это предположение отчасти уподобляло «сущность» электронной волны, но было слишком неточным. Когда вы размазываете что-нибудь, часть его находится здесь, а другая часть в другом месте. Однако никому и никогда не приходилось иметь дело с полойной или с третьей, или с иной частью электрона. Это усложняло понимание того, что представляет собой размазанный электрон. В 1926 г. немецкий физик Макс Борн существенно уточнил предложенную Шредингером интерпретацию электронной волны, и именно этой интерпретацией, усиленной Бором и его коллегами, мы пользуемся



Рис. 4.9. Волна, ассоциированная с электроном, имеет наибольшую амплитуду в тех местах, где обнаружение электрона наиболее вероятно; амплитуда волны убывает по мере уменьшения вероятности обнаружения электрона

и сегодня. Утверждение Борна касается одного из самых странных свойств квантовой теории, тем не менее, оно подтверждается огромным количеством экспериментальных данных. Согласно этому утверждению электронная волна должна интерпретироваться с точки зрения *вероятности*. В тех областях, где амплитуда (или, точнее, квадрат амплитуды) волны *больше*, обнаружение электрона *более вероятно*; в местах, где амплитуда мала, *вероятность* обнаружить электрон *меньше*. Пример показан на рис. 4.9.

Это действительно необычная идея. Какое отношение имеет вероятность к формулировке фундаментальных законов физики? Мы привыкли к тому, что вероятность присутствует лошадиным бега, подбрасыванию монеты или игре в рулетку, но в этих случаях она просто является отражением *неполноты* нашего знания. Если мы *точно* знаем скорость колеса рулетки, вес и твердость шарика, который бегают по нему, положение и скорость шарика в тот момент, когда он падает на колесо, свойства материала ячеек и т. п., и если мы используем для наших вычислений достаточно мощные компьютеры, мы можем, в соответствии с законами классической физики, совершенно точно предсказать, где остановится шарик. В казино полагаются на неспособность игрока получить всю эту информацию и провести необходимые вычисления перед тем, как сделать ставку. Однако можно сделать — предсказать вероятность, с которой придется сталкиваться во время игры в рулетку, не от-

ражает никаких фундаментальных свойств Вселенной. Напротив, квантовая механика вводит понятие вероятности в устройство мироздания на гораздо более глубоком уровне. Согласно утверждению Борна, подкрепленному собранными более чем за полвека экспериментальными данными, наличие у материи волновых свойств подразумевает, что фундаментальное описание материи должно иметь вероятностный характер. Закон де Бройля показывает, что для макроскопических объектов, таких как кофейная чашка или рулеточное колесо, волновые свойства являются практически ненаблюдаемыми, и в обычных ситуациях связанная с ними квантово-механическая вероятность может полностью игнорироваться. Но этот же закон говорит, что на микроскопическом уровне мы, в лучшем случае, можем указать только вероятность того, что электрон будет обнаружен в любом заданном месте.

Допустим, что электронные волны обладают теми же свойствами, что и все другие волны, например, они могут сталкиваться с препятствиями и образовывать вторичные волны. Однако в рамках вероятностного описания из этого не следует, что сам электрон распадается на части. Это означает лишь, что имеются области, в которых электрон может появиться с ненулевой вероятностью. На практике это означает, что если мы будем снова и снова повторять совершенно одинаковым образом какой-либо эксперимент с электроном, касающийся, например, измерения его положения, мы *не будем* всегда получать одинаковый результат. Повторяющиеся эксперименты дадут набор различных результатов, в которых частота появления электрона в заданном месте будет функцией плотности вероятности электронной волны. Если функция плотности вероятности для волны (или, точнее, квадрат плотности вероятности) для точки А в два раза больше, чем для точки В, то при многократном повторении опыта мы увидим, что электрон будет обнаруживаться в точке А в два раза чаще, чем в точке В. Точный результат эксперимента не может быть предсказан; лучше, что можно сделать — предсказать вероятность данного *возможного* исхода.

Однако если математическое выражение для функции плотности вероятности известно точно, то даже при такой неопределенности исходов вероятностный прогноз *может* быть проверен путем многократного повторения эксперимента, что позволяет экспериментально определить вероятность того или иного конкретного результата. Всего через несколько месяцев после появления гипотезы де Бройля Шредингер сделал важный шаг в этом направлении, предложив уравнение, которое определяет форму и эволюцию таких вероятностных волн, или, как они теперь называются, *волновых функций*. Вскоре уравнение Шредингера и вероятностная интерпретация были использованы для получения фантастически точных предсказаний. Таким образом, к 1927 г. классическая наука была утрачена. Ушли те дни, когда Вселенная представлялась рабствующим как часы механизмом, объекты которого, привнесенные в движение в какой-то момент в прошлом, покорно следовали к неизбежному, единственному образом определяемому пункту назначения. Согласно квантовой механике Вселенная развивается в соответствии со строгими и точными математическими законами, но эти законы определяют только вероятность того, что может наступить то или иное конкретное будущее, и ничего не говорят о том, какое будущее наступит в действительности.

Многие сочтут этот вывод обескураживающим или даже совершенно неприемлемым. Одним из таких людей был Эйнштейн. В одном из наиболее известных в истории физики высказываний он предостерегал сторонников квантовой механики: «Бог не играет в кости со Вселенной». Он считал, что вероятность появляется в фундаментальной физике по той же причине, по которой она появляется в игре в рулетку: вследствие существенной неполноты нашего знания. С точки зрения Эйнштейна, во Вселенной нет места для будущего, точное содержание которого включает элементы вероятности. Физики должны предсказывать, *как* будет развиваться Вселенная, а не определять вероятность того, что события могут пойти каким-то путем. Но эксперимент за экспериментом (некоторые из наиболее впечатляющих были

выполнены уже после его смерти) убедительно подтверждали, что Эйнштейн был не прав. Как заметил однажды по этому поводу британский физик-теоретик Стивен Хокинг: «Заблуждался Эйнштейн, а не квантовая теория»⁶.

Тем не менее, споры о том, что в действительности представляет собой квантовая механика, не утихают. Все согласны в том, как использовать уравнения квантовой механики для получения точных предсказаний. Нет согласия в вопросах о том, что в действительности представляют собой волновые функции, каким образом частица «выбирает» какому из многих вариантов будущего ей следовать. Нет согласия даже в вопросе о том, действительно ли она выбирает или вместо этого разделяется, подобно разветвляющемуся руслу реки, и живет во всех возможных будущих, в вечно расширяющемся мире параллельных вселенных. Эти интерпретации сами по себе заслуживают отдельной книги, и, в действительности, есть немало превосходных книг, пропагандирующих тот или иной взгляд на квантовую теорию. Но совершенно определенным кажется тот факт, что независимо от интерпретации квантовой механики, она неопровержимо доказывает, что Вселенная основана на принципах, которые являются несущественными с точки зрения повседневного опыта.

Общий урок, который дают теория относительности и квантовая механика, состоит в том, что в ходе глубоких исследований основ мироздания можно столкнуться с фактами, которые очень сильно отличаются от наших ожиданий. Отвста при постановке новых вопросов может потребоваться непредвзятая гибкость, когда нам придется принимать неожиданные точки зрения.

Точка зрения Фейнмана

Ричард Фейнман был одним из величайших физиков-теоретиков со времен Эйнштейна. Он полностью принял вероятностную интерпретацию квантовой механики, но после Второй мировой войны предложил новый взгляд на эту теорию. С позиций численных

предсказаний точка зрения Фейнмана *полностью согласна* с тем, что было известно ранее. Но ее формулировка существенно отличается от общепринятой. Рассмотрим ее в контексте экспериментов с электронами и двумя щелями.

Проблема с интерпретацией рис. 4.8 возникает потому, что в нашем представлении электрон проходит либо через левую щель, либо через правую, и поэтому мы рассчитываем увидеть комбинацию картин рис. 4.4 и 4.5, показанную на рис. 4.6. Электрону, проходящему через правую щель, должно быть все равно, существует ли левая щель, и наоборот. Но каким-то образом он ее чувствует. Получаемая интерференционная картина требует взаимодействия и сообщения между *чем-то*, чувствительным к обеим щелям, даже если электроны выстреливаются поодиночке. Шредингер, де Бройль и Борн объясняли этот феномен, приписывая каждому электрону волновую функцию. Подобно волнам на поверхности воды, показанным на рис. 4.7, волны функции плотности вероятности электрона «видят» обе щели и испытывают своего рода интерференцию при наложении. На тех участках, где вероятностная волна усиливается при наложении, подобно участкам значительного усиления колебаний на рис. 4.7, обнаружение электрона вероятно, а там, где вероятностная волна ослабляется при наложении, подобно местам с минимальной амплитудой или отсутствием колебаний на рис. 4.7, обнаружение электрона маловероятно или невероятно. Электроны сталкиваются с фосфоресцирующим экраном один за другим, распределенные в соответствии с функцией плотности вероятности и, в конечном итоге, образуют интерференционную картину, схожую с той, которая показана на рис. 4.8.

Фейнман выбрал другой подход. Он усомнился в основном классическом предположении, согласно которому каждый электрон проходит либо через левую щель, либо через правую. На первый взгляд это предположение настолько фундаментально, что сомневаться в нем нелепо. В конце концов, разве вы не можете заглянуть в область, расположенную между щелями и фосфоресцирующим экраном, и посмотреть, сквозь какую

щель проходит каждый электрон? Да, вы можете. Но тем самым вы *изменяете* эксперимент. Чтобы *увидеть* электрон, вы должны *сделать* с ним что-нибудь — например, осветить его, т. е. столкнуться с ним фотон. В повседневных масштабах фотон действует как исчезающе малый зонд, который отскакивает от деревьев, картин и людей, не оказывая практически никакого влияния на движение этих сравнительно больших материальных тел. Но электрон — это ничтожно малая частица материи. Независимо от того, насколько осторожно вы будете определять щель, через которую он прошел, отражающийся от электрона фотон неизбежно повлияет на его последующее движение. А это изменение движения изменит результат нашего эксперимента. Если ваше вмешательство будет достаточно сильным для того, чтобы вы смогли определить щель, через которую прошел электрон, результат эксперимента изменится, и вместо картины, показанной на рис. 4.8, вы получите картину, подобную той, которая изображена на рис. 4.6! Квантовый мир гарантирует, что как только вы установили, через какую щель, правую или левую, прошел каждый электрон, интерференция между этими двумя щелями исчезнет.

Таким образом, Фейнман укрепился в своих сомнениях: хотя повседневный опыт говорит о том, что электрон должен проходить через одну из двух щелей, к концу 1920-х гг. физики поняли, что любая попытка проверить это якобы фундаментальное свойство неизбежно приведет к искажению результатов эксперимента.

Фейнман провозгласил, что каждый электрон, который проходит через преграду и попадает на фосфоресцирующий экран, проходит через *обе* щели. Это звучит дико, но не торопитесь возмущаться, вас ждет кое-что более сумасшедшее заявление. Фейнман высказал утверждение, что на отрезке от источника до некоторой точки на фосфоресцирующем экране каждый электрон взаимодействует с этой точкой отдельно и одновременно с каждой из щелей. Фейнман не только не торопится возмущаться, вас ждет кое-что более сумасшедшее заявление. Фейнман высказал утверждение, что на отрезке от источника до некоторой точки на фосфоресцирующем экране каждый электрон взаимодействует с этой точкой отдельно и одновременно с каждой из щелей. Фейнман не только не торопится возмущаться, вас ждет кое-что более сумасшедшее заявление. Фейнман высказал утверждение, что на отрезке от источника до некоторой точки на фосфоресцирующем экране каждый электрон взаимодействует с этой точкой отдельно и одновременно с каждой из щелей.

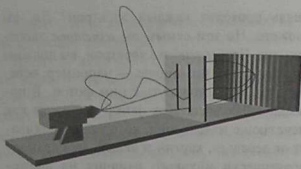


Рис. 4.10. Согласно формулировке квантовой механики, предложенной Фейнманом, частица, перемещающаяся из одной точки в другую, движется одновременно по всем возможным путям. Здесь показано несколько из бесконечного числа возможных траекторий для одного электрона, движущегося от источника к фосфоресцирующему экрану. Обратите внимание, что этот один электрон на самом деле проходит через обе щели

Одновременно он столь же упорядоченно проходит через правую щель. Он направляется к левой щели, но вдруг меняет направление и устремляется к правой. Он петляет вперед и назад, и наконец, проходит через левую щель. Он отправляется в долгое путешествие к туманности Андромеды, там он разворачивается, возвращается назад и проходит через левую щель на пути к экрану. Он движется и так и этак — согласно Фейнману, электрон одновременно «рышет» по всем возможным путям, соединяющим пункт отправления и пункт назначения.

Фейнман показал, что каждому из этих путей можно поставить в соответствие некоторое число, и общее среднее этих чисел даст ту же вероятность, что и расчет с использованием волновой функции. Итак, с точки зрения Фейнмана, с электроном не нужно связывать никакой вероятностной волны. Вместо этого мы должны представить себе нечто столь же, если не более, странное. Вероятность того, что электрон, — который во всех отношениях проявляет себя частичей, — появится в некоторой заданной точке экрана, определяется суммарным эффектом от всех возможных путей, ведущих в эту точку. Этот подход к квантовой механике известен как *фейнмановское суммирование по путям*⁷⁾.

Здесь начинает протестовать наше классическое образование: как может один электрон одновременно перемещаться по различ-

ным путям, да еще и по бесконечному числу путей? Это возражение кажется неоспоримым, но квантовая механика — реальная физика нашего мира — требует, чтобы вы держали столь тривиальные возражения при себе. Результаты расчетов с использованием фейнмановского подхода согласуются с результатами, полученными с применением метода волновых функций, которые, в свою очередь, согласуются с экспериментальными данными. Вы должны позволить природе самой определять, что является разумным, а что — неразумным. Как написал в одной из своих работ Фейнман: «[Квантовая механика] дает совершенно абсурдное с точки зрения здравого смысла описание Природы. И оно полностью соответствует эксперименту. Так что я надеюсь, что вы сможете принять Природу такой, как Она есть — абсурдной»⁸⁾.

Однако независимо от того, насколько абсурдной является природа на уровне микромира, при переходе к нашим обычным масштабам любая теория должна приводить к привычным прозрачным событиям. Как показал Фейнман, для движения больших тел, таких как бейсбольные мячи, аэронавы или планеты, каждое из которых является огромным по сравнению с субатомными частицами, его правило определения весов различных траекторий гарантирует, что *все траектории, кроме одной, взаимно сократятся* при суммировании их вкладов. В действительности, когда дело касается движения классического тела, значение имеет только одна траектория из бесконечного их количества. И это именно та траектория, которая следует из ньютоновских законов движения. Вот почему в нашем повседневном мире нам кажется, что тела (такие, как брошенный в воздух мяч) следуют вдоль единственной, уникальной и предсказуемой траектории из начальной точки в пункт назначения. Но для объектов микромира фейнмановское правило назначения весов траекторий показывает, что свой вклад в движение объекта могут вносить (и часто вносят) многочисленные возможные траектории. Например, в эксперименте с двумя щелями некоторые из траекторий проходят через разные щели, приводя к образованию интерференционной

картины. В микромире мы не можем гарантировать, что электрон пройдет только через одну щель или только через другую. Интерференционная картина и фейнмановская альтернативная формулировка квантовой механики недвусмысленно поддерживают друг друга.

Как разные мнения с книги или фильма могут оказаться полезными для понимания различных моментов этого произведения, так и различные подходы к квантовой механике помогают углубить понимание этой теории. Хотя предсказания метода волновых функций и фейнмановского суммирования по траекториям полностью согласуются друг с другом, в их основе лежат совершенно различные представления. Как мы увидим позднее, для разных приложений тот или иной подход может стать неосознанным средством объяснения.

Квантовые чудеса

К настоящему моменту у вас должно было появиться некоторое представление о волнующем новом образе мироздания согласно квантовой механике. Если вы еще не впечатлились от поразительных высказываний Бора, квантовые чудеса, о которых пойдет речь ниже, заставят вас, по крайней мере, испытать головокружение.

Квантовую механику трудно понять на интуитивном уровне, еще труднее, чем теорию относительности — для этого нужно начать мыслить подобно миниатюрному человеку, родившемуся и выросшему в микромире. Существует, однако, одно положение этой теории, которое может служить путеводителем для интуиции, своего рода пробным камнем, который отличает квантовую логику от классической. Это *соотношение неопределенностей*, открытое немецким физиком Вернером Гейзенбергом в 1927 г.

Это соотношение выросло из проблемы, с которой мы уже сталкивались выше. Мы установили, что процедура определения щели, через которую проходит каждый из электронов (т.е. определение положения электронов), неизбежно вносит возмущения в их последующее движение. Однако вспомним,

что убедиться в присутствии другого человека можно разными способами — можно дать ему ушестый шлепок по спине, а можно нежно коснуться его. Тогда что мешало нам определить положение электрона с помощью «более нежного» источника света, который бы оказывал меньшее влияние на его дальнейшее движение? С точки зрения физики XIX в. это вполне возможно. Используя все более слабую лампу (и все более чувствительный датчик светового излучения), мы можем оказывать исчезающе малое влияние на движение электрона. Но квантовая механика демонстрирует изъян в наших рассуждениях. Известно, что уменьшая интенсивность источника света, мы уменьшаем количество испускаемых фотонов. Когда мы дойдем до излучения отдельных фотонов, мы уже не сможем далее уменьшать интенсивность света без того, чтобы не выключить его совсем. Это фундаментальный квантово-механический предел «нежности» нашего исследования. Таким образом, всегда существует минимальное возмущение, которое мы вносим в движение электрона путем измерения его положения.

Что ж, все это верно. Однако закон Планка говорит, что энергия единичного фотона пропорциональна его частоте (и обратно пропорциональна длине волны). Следовательно, используя свет все меньшей и меньшей частоты (и, соответственно, все большей длины волны), мы можем делать отдельные фотоны все более «нежными». Однако и здесь есть загвоздка. Когда волна направляется на объект, получаемая информация будет достаточной для того, чтобы определить положение объекта с некоторой *неулычивой* погрешностью, равной длине волнотранспортной погрешности. Для того чтобы получить интуитивное представление об этом важном факте, представим, что мы пытаемся определить положение большой скалы, находящейся немного ниже уровня моря, по влиянию, которое она оказывает на проходящие морские волны. Приближаясь к скале, волны образуют заметательные упорядоченные последовательности следующих одну за другой гребней и впадин. После прохождения над скалой форма волн искажается — верный признак наличия подводной скалы. Но подобно

самым мелким делениям на линейке, отдельный цикл волны, образованный гребнем и впадиной, является мельчайшей единицей в последовательности волн, поэтому, если мы наблюдаем только возмущение в движении волн, мы можем определить положение скалы лишь с точностью, равной одному волновому циклу, или длине волны. В случае света составляющие его фотоны представляют собой, грубо говоря, отдельные волновые циклы (при этом высота циклов определяется числом фотонов); следовательно, при определении положения объекта фотон даст точность, равную длине волны.

Таким образом, мы сталкиваемся со своего рода квантово-механической компенсацией. Если мы используем высокочастотный свет (малой длины волны), мы можем с высокой точностью определить положение электрона. Но высокочастотные фотоны несут очень большое количество энергии и поэтому вносят большие возмущения в скорость движения электронов. Если мы используем низкочастотный свет (большой длины волны), мы минимизируем его влияние на движение электрона, поскольку фотоны, составляющие этот свет, имеют относительно низкую энергию, но в этом случае мы вынуждены пожертвовать точностью определения положения электрона. Гейзенберг выразил все это в виде математического соотношения между точностью измерения положения электрона и точностью определения его скорости. Он установил, что эти величины обратно пропорциональны друг другу: большая точность в определении положения неизбежно ведет к большей неточности в определении скорости, и наоборот. Что еще более важно, хотя мы и ограничили наше обсуждение одним конкретным способом определения местоположения электрона, согласно Гейзенбергу компромисс между точностью определения положения и скорости является фундаментальным фактом, который остается справедливым независимо от используемого оборудования и метода измерения. В отличие от теорий Ньютона и даже Эйнштейна, в которых движущаяся частица описывается ее положением и скоростью, согласно квантовой механике на микроскопическом уровне *вы не можете знать*

оба этих параметра с одинаковой точностью. Более того, чем точнее вы знаете один параметр, тем больше погрешность другого. Хотя мы ограничили наше описание электронами, то же самое относится ко *всем* составным элементам мироздания.

Эйнштейн пытался минимизировать этот отход от позиций классической физики, утверждая, что хотя квантовая механика определенно ставит предел нашему *знанию* положения и скорости, электрон, тем не менее, *имеет* определенное положение и скорость в том смысле, который мы привыкли вкладывать в эти слова. Однако в течение последних двух десятилетий прогресс в теоретической физике, достигнутый группой исследователей, возглавляемых ирландским физиком Джоном Беллом, и экспериментальные данные Алана Аспекта и его коллег убедительно продемонстрировали, что Эйнштейн был не прав. Про электроны, как и про любые другие частицы, нельзя одновременно сказать, что они находятся в таком-то месте и имеют такую-то скорость. Квантовая механика показывает, что это утверждение не только не может быть проверено экспериментально (по причинам, объясненным выше), но оно, кроме того, прямо противоречит другим, совсем недавно полученным экспериментальным данным.

В действительности происходит так: если вы поместите электрон в большую коробку и затем начнете медленно сдвигать ее стенки, чтобы определить его положение с увеличивающейся точностью, вы обнаружите, что движение электрона будет становиться все более и более неустойчивым. Электрон, будто охваченный своего рода клаустрофобией, будет возбуждаться все сильнее — отскакивая от стенок коробки со все возрастающей и непредсказуемой скоростью. Природа не позволяет заглянуть в угол своих компонентов. Как вы помните, в Н-баре, где мы сделали значение \hbar гораздо большим, чем оно есть в реальном мире, чтобы квантовые эффекты могли непосредственно влиять на объекты реального мира, кубики льда в напитках Джорджа и Грейс находились в неустойчивом движении, как будто тоже страдали от квантовой клаустрофобии. Хотя Н-бар является фантазией — в действитель-

ности значение \hbar исчезающе мало — точно такая же квантовая клаустрофобия является неотъемлемым свойством микромира. Движение микрочастиц становится все более хаотическим, по мере того как их положение ограничивается при исследовании все меньшими областями в пространстве.

Соотношение неопределенности лежит в основе еще одного потрясающего явления, известного под названием *квантового туннелирования*. Если вы выстрелите пластиковой пулей в бетонную стену толщиной в десять футов, то результат будет полностью соответствовать и вашему интуитивным представлениям, и классической физике: пуля отскочит назад. Причина состоит в том, что у пули просто недостаточно энергии, чтобы пробить такое прочное препятствие. Однако если перейти на уровень фундаментальных частиц, то, как совершенно определенно показывает квантовая механика, в волновую функцию (или, иначе, вероятностную волну) каждой составляющей пулю частицы заложена небольшая вероятность того, что эта частица может пройти сквозь стену. Это означает, что существует маленькая, но ненулевая, вероятность того, что пуля на самом деле *может* пройти сквозь стену и оказаться на другой стороне. Как такое может случиться? Причина снова содержится в соотношении неопределенностей Гейзенберга.

Чтобы понять это, представьте, что вы живете в полной нищете и вдруг узнаете, что ваш дальний родственник отошел в лучший мир, оставив вам огромное состояние. Единственная проблема состоит в том, что у вас нет денег для покупки билета на самолет. Вы объясняете ситуацию своим друзьям: если они помогут вам преодолеть барьер между вами и наследством, севудив деньги на билет, вы вернете им долг с процентами после возвращения. Но ни у кого нет денег, чтобы дать вам в долг. Тут вы вспоминаете про вашего старого друга, который работает в авиакомпании, и обращаетесь к нему с той же просьбой. Он тоже не может дать вам денег займы, но предлагает другое решение. Система учета в авиакомпании такова, что если вы выложите деньги в уплату за билет телеграфным переводом в течение 24 часов с момента прибытия в пункт назна-

чения, никто не узнает, что вы не уплатили их до вылета.

Система учета в квантовой механике довольно схожа с этой. Показав, что существует компромисс между точностью измерения местоположения и скорости, Гейзенберг, кроме того, продемонстрировал существование компромисса между точностью измерения энергии и тем, *сколько времени* занимают эти измерения. Согласно квантовой механике вы не можете утверждать, что частица имеет в точности такую-то энергию в точной такой-то момент времени. За возрастающую точность измерения энергии приходится платить возрастающей продолжительностью проведения измерений. Грубо говоря, это означает, что энергия частицы может флуктуировать в очень широких пределах, если измерения проводятся в течение достаточно короткого периода времени. Поэтому точно так же как система учета в авиакомпании «позволяет» вам занять «деньги» на билет при условии, что вы вернете их достаточно быстро, квантовая механика «позволяет» частице «занять» энергию при условии, что она может вернуть ее в течение промежуточного времени, определяемого соотношением неопределенностей Гейзенберга.

Математический аппарат квантовой механики показывает, что чем выше энергетический барьер, тем меньше вероятность того, что такой создательный микроскопический перучет произойдет. Однако если говорить о микроскопических частицах, находящихся перед бетонной плитой, они имеют возможность занять достаточное количество энергии и иногда делают то, что с точки зрения классической физики является невозможным: они мгновенно проходят через область, для проникновения в которую у них раньше не хватало энергии. При переходе к более сложным объектам, состоящим из большого числа частиц, возможность квантового туннелирования сохраняется, но становится очень маловероятной, поскольку требует, чтобы *все* частицы совершили переход одновременно. Однако шокроующие эпизоды, подобные исчезновению сигары Джорджа, подобные кубика льда сквозь стену бокала и проход Джорджа и Грейс сквозь стену бара, *могут* происходить. В фантастическом

месте, подобном Н-бару, в котором значения \hbar велики, квантовое туннелирование является обычным делом. Однако квантовой механикой правят законы вероятности. В частности, малость значения \hbar в реальном мире означает, что если вы будете каждую секунду атаковать бетонную стену, вам придется потратить время, превышающее возраст Вселенной, прежде чем у вас появится сколь угодно заметный шанс пройти сквозь стену в одной из попыток. Однако, имея бесконечное терпение (и такую же продолжительность жизни), рано или поздно вы можете оказаться с другой стороны.

Соотношение неопределенностей является сердцевинной квантовой механики.

Свойства, которые кажутся нам обычно столь фундаментальными, что не вызывают никаких сомнений, — что объекты имеют определенное положение и скорость, и что в определенные моменты времени они имеют определенную энергию, — теперь представляются всего лишь следствием того, что постоянная Планка так мала в масштабах нашего повседневного мира. Первостепенное значение имеет то, что применение этих квантовых принципов к структуре пространства-времени демонстрирует фатальное несовершенство «основ гравитации» и приводит нас к третьему и наиболее серьезному противоречию, с которым столкнулись физики в течение последнего столетия.

Глава 5

Необходимость новой теории: общая теория относительности *versus* квантовая механика

За последнее столетие наше понимание физического мира чрезвычайно углубилось. Теоретический аппарат квантовой механики и общей теории относительности позволил понять и предсказать доступные экспериментальной проверке физические явления, происходящие как на масштабах атомного и субатомного мира, так и на масштабах галактик, скоплений галактик и самой Вселенной в целом. Это фундаментальное достижение. Поистине вдохновляет то, что существа, обитающие на одной из планет, обращающейся вокруг заурядной звезды на окраине ничем не примечательной галактики, сумели путем размышлений и эксперимента выяснить и постичь ряд самых загадочных свойств физического мира. Тем не менее физики так устроены, что они никогда не будут удовлетворены до тех пор, пока не почувствуют, что достигли глубочайшего и наиболее фундаментального понимания Вселенной. Это то, что Стивен Хокинг назвал первым шагом к познанию «замысла Бога»¹⁾.

Существует много свидетельств того, что квантовая механика и общая теория относительности не позволяют достичь этого глубочайшего уровня понимания. Поскольку их обычные области применения столь сильно различаются, в большинстве случаев требуется использование *либо* квантовой механики, *либо* общей теории относительности, но не обеих теорий одновременно. Но в некоторых экстремальных условиях, когда тела очень массивны и одновременно чрезвычайно малы по размерам (например, вещество вблизи центра черных дыр или Вселенная в целом в момент Большого взрыва), для полного понимания требуется как общая теория относительности, так и квантовая механика. Однако, подобно встрече огня и поро-

ха, попытка объединения квантовой механики и общей теории относительности приводит к разрушительной катастрофе. При объединении уравнений этих теорий правильно поставленные физические задачи дают бессмысленные ответы. Бессмыслица часто принимает форму прогноза, что квантовомеханическая вероятность некоторых процессов равна не 20, 73 или 91 %, а *бесконечности*. Но что же может означать вероятность, превышающая единицу, не говоря уже о бесконечности? Мы вынуждены заключить, что здесь есть какой-то серьезный порок. Внимательно анализируя основные понятия общей теории относительности и квантовой механики, можно выяснить, что же это за порок.

Суть квантовой механики

Когда Гейзенберг открыл соотношение неопределенностей, в физике произошел резкий поворот, и назад пути нет. Вероятности, волновые функции, интерференция и кванты — все это требует радикально новых способов видения мира. Однако не исключено, что какой-нибудь твердолобый физик-«классик» продолжает держаться за тонкую нить надежды, что когда все уляжется, эти отклонения от «классики» удастся встроить в систему понятий, не слишком сильно отличающуюся от прежних представлений. Однако соотношение неопределенностей ясно и недвусмысленно отрицает любую возможность возврата к прошлому.

Соотношение неопределенностей утверждает, что при переходе к меньшим расстояниям и меньшим промежуткам времени жизнь Вселенной становится все более неустойчивой. Мы столкнулись с некоторыми

свидетельствами этого при описании в предыдущей главе попыток точного определения положения элементарных частиц, таких как электроны. Освещая электроны светом все возрастающей частоты, мы изменяем их положение со все большей точностью, но за это приходится платить тем, что сами измерения вносят все большие возмущения. Высокочастотные фотоны обладают большой энергией и, следовательно, дают электронам резкий «толчок», значительно изменяющий их скорости. Подобно беспорядку в комнате, полной детей, мгновенное положение которых вам известно с большой точностью, но скорость которых, точнее, величину скорости и направление перемещения, вы почти не можете контролировать, эта неспособность определить одновременно положение и скорость элементарных частиц свидетельствует об изначальной хаотичности микромира.

Хотя этот пример выражает фундаментальную связь между неопределенностью и хаосом, на самом деле он раскрывает только часть общей картины. Например, можно было бы думать, что неопределенность возникает только тогда, когда мы — бестактные наблюдатели — вмешиваемся в происходящее на сцене мироздания. Это *не верно*. Пример попытки удержать электрон в небольшой коробке и его бурная реакция на это — увеличение скорости и хаотичности движения — поводит нас немного ближе к истине. Даже без «прямых столкновений» с вносящими возмущения «экспериментаторскими» фотонами скорость электрона резко и непредсказуемо изменяется от одного момента времени к другому. Но и этот пример не раскрывает все ошеломляющие свойства микромира, следующие из открытия Гейзенберга. Даже в самой спокойной ситуации, которую только можно себе представить, например, в пустой области пространства, согласно соотношению неопределенностей в микромире имеет место невероятная активность. И эта активность возрастает по мере уменьшения масштабов расстояния и времени.

В понимании этого ключевую роль играет принцип квантово-механического баланса. Мы видели в предыдущей главе, что точно так же, как вы можете занять денег, чтобы

решить важные финансовые проблемы, частица (например, электрон) может временно занять энергию, чтобы преодолеть реальный физический барьер. Это так. Но квантовая механика заставляет нас углубить эту аналогию. Представьте себе маниакального земщика, который ходит от одного приятеля к другому, прося денег взаимы. Чем короче период времени, на который приятель может дать ему деньги, тем большую сумму он просит. Занимает и отдает, занимает и отдает — снова и снова он берет деньги в долг только для того, чтобы вскоре вернуть их. Как цены на акции в те дни, когда биржа ведет себя подобно американским горкам, количество денег, которые есть у маниакального земщика в любой заданный момент времени, испытывает чрезвычайно сильные колебания, но по завершении всех этих операций его финансовый баланс находится в том же состоянии, в котором он был в начале.

Из соотношения неопределенностей Гейзенберга следует, что подобный хаотический перенос энергии и импульса непрерывно происходит во Вселенной на микроскопических расстояниях и в микроскопическом временном масштабе. Согласно соотношению неопределенностей, даже в пустых областях пространства (например, в пустой коробке) энергия и импульс являются *неопределенными*: они флуктуируют между крайними значениями, которые возрастают по мере уменьшения размеров коробки и временного масштаба, на котором проводятся измерения. Это выглядит так, как если бы область пространства внутри коробки являлась маниакальным «земщиком» энергии и импульса, непрерывно беря «в долг» у Вселенной и неизменно «возвращая долг». Но что участвует в этих обменах, например, в пустой области пространства? Все. В буквальном смысле слова. Энергия (как и импульс) являются универсальной конвертируемой валютой. Формула $E = mc^2$ говорит нам, что энергия может превращаться в материю и наоборот. Например, если флуктуации энергии достаточно велики, они могут привести к мгновенному возникновению электрона и соответствующей ему античастицы — позитрона, даже в области, которая первоначально была пустой! Поскольку энергия

должна быть быстро возвращена, данные частицы должны спустя мгновение аннигилировать, высвободив энергию, заимствованную при их создании. То же самое справедливо для всех других форм, которые могут принимать энергия и импульс — при рождении и аннигиляции других частиц, сильных колебаниях интенсивности электромагнитного поля, флуктуациях полей сильно- и слабого взаимодействия. Квантово-механическая неопределенность говорит нам, что в микроскопическом масштабе Вселенная является аренной, изобилующей бурными и хаотическими событиями. Как заметил однажды Фейнман, «возникать и аннигилировать, возникать и аннигилировать — какая пустая трата времени»². Поскольку заем и возврат в среднем компенсируют друг друга, пустая область в пространстве продолжает выглядеть тихой и спокойной, если исследовать ее в любом масштабе, кроме микроскопического. Однако соотношение неопределенностей указывает, что макроскопическое усреднение скрывает интенсивную микроскопическую активность³. Как мы увидим вскоре, этот хаос и является *препятствием* к слиянию общей теории относительности и квантовой механики.

Квантовая теория поля

На протяжении 1930-х и 1940-х гг. физики-теоретики во главе с такими личностями, как Поль Дирак, Вольфганг Паули, Юлиан Швингер, Фриман Дайсон, Син-Итиро Томонага и Фейнман, не покладая рук пытались разработать математический аппарат, который помог бы справиться с буйством микромира. Они установили, что квантовое волновое уравнение Шредингера (упомянутое в главе 4) на самом деле дает только приближенное описание физики микромира. Это приближенное описание работает очень хорошо, пока вы не пытаетесь (экспериментально или теоретически) слишком глубоко заглянуть в микроскопический хаос, но определенно отказывается работать, если кто-то делает такую попытку.

Основным разделом физики, которым Шредингер пренебрег в своей формулировке

квантовой механики, была специальная теория относительности. На самом деле Шредингер сначала *сделал попытку* включить специальную теорию относительности, но полученное в результате квантовое уравнение давало предсказания, находившиеся в противоречии с экспериментальными данными для атома водорода. Это побудило Шредингера воспользоваться широко применяемым в физике подходом «разделяй и властвуй»: вместо того, чтобы пытаться всем махом объединить в новой теории все, что известно о физическом мире, часто гораздо выгоднее бывает делать небольшие шаги, которые последовательно включают новейшие открытия, сделанные на переломе крае исследований. Шредингер искал и нашел математический аппарат, который позволил учесть экспериментально подтвержденный корпускулярно-волновой дуализм, но он не смог на этой стадии включить в рассмотрение специальную теорию относительности⁴.

Однако вскоре физики осознали, что специальная теория относительности крайне важна для корректной формулировки законов квантовой механики. Хаос микромира требует признания, что энергия может проявлять себя самыми различными способами. Впервые это было осознано в формуле специальной теории относительности $E = mc^2$. Игнорируя специальную теорию относительности, подход Шредингера не учитывал взаимосимметричность материи, энергии и движения.

Прежде всего физики сконцентрировали свои усилия на попытках объединить специальную теорию относительности с принципами квантовой механики при описании электромагнитного поля и его взаимодействия с веществом. В результате серии вложенных достижений они создали *квантовую электродинамику*. Это был пример *ретроспективной квантовой теории поля* или, *релятивистской квантовой теории поля*. Такая теория кратко, *квантовой теории поля*. Такая теория является квантовой, поскольку она с самого начала строилась с использованием понятия вероятности и неопределенности; она является теорией поля, поскольку объединяет понятия квантовой механики и ранее

существовавшее классическое представление о силовом поле, в данном случае, максвелловском электромагнитном поле. Наконец, эта теория является релятивистской, поскольку с самого начала учитывает специальную теорию относительности. (Если вам нужен визуальный образ квантового поля, вы можете использовать образ классического поля, скажем, океан невидимых силовых линий, пронизывающих пространство, дополнив его в двух отношениях. Во-первых, вы должны представить квантовое поле образованным из частиц-составляющих, таких как фотоны в случае электромагнитного поля. Во-вторых, вы должны представить, что энергия, сосредоточенная в массах частиц и их движении, бесконечно много раз переходит от одного квантового поля к другому в процессе их непрерывных осцилляций в пространстве и времени.)

Квантовая электродинамика, бесспорно, является наиболее точной из когда-либо созданных теорий, описывающих природные явления. Иллюстрацию ее точности можно найти в работах Тойхио Киношита, специалиста по физике элементарных частиц из Корнельского университета, который в течение последних 30 лет неутомимо использовал квантовую электродинамику для расчета некоторых тонких свойств электронов. Расчеты Киношита заполняют тысячи страниц, и в конце концов потребовали для завершения самых мощных из когда-либо созданных компьютеров. Но затраченные им усилия принесли свои плоды, позволив рассчитать характеристики электронов, которые подтвердились экспериментально с точностью, превышающей одну миллиардную. Это согласие между результатами абстрактных теоретических вычислений и данными реального мира совершенно поразительно. С помощью квантовой электродинамики физики смогли подтвердить роль фотонов как «наименьших возможных ступок света» и описать их взаимодействие с электрически заряженными частицами в рамках математически законченной модели, позволяющей получать убедительные предсказания.

Успех квантовой электродинамики побудил других физиков в 1960-х и 1970-х гг.

попытаться использовать аналогичный подход для квантово-механического описания слабого, сильного и гравитационного взаимодействий. Для слабого и сильного взаимодействий этот подход оказался чрезвычайно плодотворным. Физики сумели, по аналогии с квантовой электродинамикой, разработать квантово-полевые теории сильного и слабого взаимодействий, получившие название *квантовой хромодинамики* и *квантовой теории электрослабых взаимодействий*. Название «квантовая хромодинамика» выбрано из-за колорита, более логичным было бы «квантовая динамика сильных взаимодействий», но это всего лишь название без глубокого смысла. С другой стороны, название «электрослабое» указывает на важную веху в нашем понимании взаимодействий в природе.

В работе, за которую Шелдон Глэузу, Абдус Салам и Стивен Вайнберг получили Нобелевскую премию, они показали, что слабое и электромагнитное взаимодействия естественным образом объединяются в квантово-полевом описании, несмотря на то, что их проявления в окружающем нас мире столь разительно различаются. Слабое взаимодействие имеет исчезающе малую величину во всех масштабах, кроме субатомного, тогда как электромагнитные поля — видимый свет, радио- и телевизионные сигналы, рентгеновское излучение — неоспорно присутствуют в нашем макроскопическом мире. Тем не менее, Глэузу, Салам и Вайнберг показали, что при достаточно высоких энергиях и температурах, которые существовали спустя долю секунды после Большого взрыва, электромагнитное и слабое взаимодействия были *слиты* одно с другим, их характеристики были неразличимы. Поэтому им дали более точное название *электрослабых взаимодействий*. Вследствие не прекращающегося со времен Большого взрыва снижения температуры из единого высокотемпературного состояния разными путями *выкристаллизовались* электромагнитное и слабое взаимодействия в ходе процесса, известного под названием *нарушение симметрии*, который мы опишем ниже. В результате эти взаимодействия приобрели различный облик в той холодной Вселенной, в которой мы обитаем в настоящее время.

Итак, если вы следите за хронологией, к 1970-м гг. физики разработали успешное квантово-механическое описание трех из четырех взаимодействий (сильного, слабого и электромагнитного), а также показали, что два из трех последних (слабое и электромагнитное взаимодействия) фактически имеют общее происхождение (электрослабое взаимодействие). В течение последних десятилетий физики подвергли это квантово-механическое описание трех негравитационных сил (как они взаимодействуют между собой и с введенными в главе 1 частицами материи) самой разнообразной экспериментальной проверке. Теория с успехом выдержала все проверки. Когда экспериментаторы измерили значения 19 параметров (масс частиц, приведенных в табл. 1.1, констант взаимодействия для этих частиц, показанных в таблице в примечании 1 к главе 1, интенсивностей трех негравитационных взаимодействий в табл. 1.2, а также ряда других величин, обсуждать которые нет необходимости), а теоретики подставили полученные значения в формулы квантово-полевых теорий для сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий частиц материи, предсказания этих теорий с поразительной точностью совпали с экспериментальными данными. Совпадение наблюдается вплоть до энергий, способных расплющить материю на частицы, размер которых составляет одну миллиардную от одной миллиардной метра, что является пределом для современного уровня развития техники. По этой причине физики называют теорию трех негравитационных взаимодействий и три семейства частиц материи *стандартной теорией*, или (чаще) *стандартной моделью* физики элементарных частиц.

Частицы-посланники

Так же, как для электромагнитного поля, наименьшим элементом которого является фотон, для полей сильного и слабого взаимодействий согласно стандартной модели имеются свои наименьшие элементы. Как упоминалось в главе 1, мельчайшие сгустки

сильного взаимодействия известны под названием *глюонов*, а соответствующие сгустки слабого взаимодействия — под названием *калибровочных бозонов слабого взаимодействия* (точнее, *W-бозонов* и *Z-бозонов*). Стандартная модель предписывает нам расправлять эти сгустки как не имеющие внутренней структуры — в рамках данной модели они столь же элементарны, как частицы, входящие в состав трех семейств частиц материи.

Фотоны, глюоны и калибровочные бозоны слабого взаимодействия обеспечивают микроскопический механизм передачи взаимодействий, которые они представляют. Например, чтобы представить себе, как одна электрически заряженная частица отталкивает другую частицу с одноименным зарядом, можно вообразить, что каждая частица окружена электрическим полем — «облаком» или «туманом», являющимся носителем «электрических свойств», — а воздействие, воспринимаемое каждой частицей, обусловлено взаимодействием их силовых полей. Более точное описание отталкивания частиц на микроскопическом уровне выглядит несколько иначе. Электромагнитное поле состоит из полчищ фотонов; взаимодействие между двумя заряженными частицами на самом деле является результатом взаимного «обстрела» фотонами. Если использовать грубую аналогию, это похоже на изменение траекторий двух конькобежцев, обстреливающих друг друга градом шаров для боулинга. Подобным же образом и две электрически заряженные частицы влияют друг на друга, обмениваясь мельчайшими частицами света.

Существенным недостатком аналогии с конькобежцами является то, что обмен шарами для боулинга всегда приводит к «отталкиванию»: он увеличивает расстояние между конькобежцами. С другой стороны, две частицы, несущие противоположный заряд, также взаимодействуют между собой, обмениваясь фотонами, но результирующая электромагнитная сила является притягивающей. Это выглядит так, как если бы фотон был переносчиком не взаимодействия как такового, а скорее *расстояния* о том, как поле должно *распространяться* на соответствующее взаимодействие. Частицам, несущим

одноименный заряд, фотон передает сообщение «отдаляйтесь», а частицам с разноименным зарядом — «сближайтесь». По этой причине фотон иногда называют *частицей-послаником* электромагнитного взаимодействия. Аналогичным образом глюоны и слабые калибровочные бозоны являются частицами-посланиками сильного и слабого атомного взаимодействия. Сильное взаимодействие, которое удерживает кварки внутри протонов и нейтронов, возникает за счет обмена глюонами между кварками. Можно сказать, что глюоны создают «клей», удерживающий эти субатомные частицы вместе. Слабое взаимодействие, отвечающее за некоторые виды превращений частиц при радиоактивном распаде, передается посредством калибровочных бозонов слабого взаимодействия.

Калибровочная симметрия

Вы, наверное, уже заметили, что в нашем обсуждении квантовой теории взаимодействий в природе не упоминается гравитация. Зная, что у физиков имеется подход, который они успешно использовали для трех других взаимодействий, вы можете ожидать, что они попытались разработать квантово-полевую теорию гравитационного взаимодействия, в которой частью, передающей гравитационное взаимодействие, будет наименьший сгусток гравитационного поля, *гравитон*. На первый взгляд это предположение кажется особенно умственным в силу того, что квантовая теория трех негравитационных взаимодействий выявила волнующее сходство между ними и свойством гравитационного поля, с которыми мы столкнулись в главе 3.

Вспомним, что гравитационное взаимодействие позволяет объявить, что все наблюдатели — независимо от состояния движения — являются абсолютно равноправными. Даже те, движение которых кажется нам ускоренным, могут заявить, что находятся в состоянии покоя, поскольку могут приписать испытываемую ими силу действию гравитационного поля. В этом смысле гравитация налагает симметрию: она гарантирует равноправие всех возможных точек зрения

и всех возможных систем отсчета. Сходство с сильным, слабым и электромагнитным взаимодействиями состоит в том, что они тоже связаны с симметриями, хотя эти виды симметрии значительно более абстрактны по сравнению с той, которая связана с гравитацией.

Для того чтобы получить общее представление об этих достаточно тонких принципах симметрии, рассмотрим один важный пример. Как указано в таблице, содержащейся в примечании 1 к главе 1, каждый кварк может быть окрашен в один из трех «цветов» (вычурно названных красным, зеленым и синим, хотя это не более чем условность и не имеет никакого отношения к цвету в обычном понимании этого слова). Эти цвета определяют его реакцию на сильное взаимодействие точно так же, как электрический заряд определяет реакцию на электромагнитное взаимодействие. Все полученные к настоящему времени данные свидетельствуют о том, что между кварками наблюдается симметрия: все взаимодействия между одноцветными кварками (красного с красным, зеленого с зеленым или синего с синим) являются идентичными, как и идентичными являются взаимодействия между разноцветными кварками (красного с зеленым, зеленого с синим или синего с красным). На самом деле факты еще более поразительны. Если три цвета, т. е. три различных сильных заряда, сдвинуть определенным образом (грубо говоря, если на нашем вычурном цветовом языке красный, зеленый и синий изменятся и станут, например, желтым, индиго и фиолетовым), то даже если параметры сдвига будут меняться от одного момента времени к другому и от точки к точке, взаимодействие между кварками останется совершенно неизменным. Рассмотрим сферу: она является примером тела, обладающего вращательной симметрией, поскольку выглядит одинаково независимо от того, как мы вращаем ее в руках и под каким углом на нее смотрим. Аналогично можно сказать, что наша Вселенная обладает *симметрией сильного взаимодействия*; физические явления не изменятся при сдвиге зарядов этого взаимодействия — Вселенная совершенно не чувствительна к ним. По историческим причинам

физики говорят, что симметрия сильного взаимодействия является примером *калибровочной симметрии*⁵⁾.

Здесь следует подчеркнуть один существенный момент. Как показали работы Германа Вейля 1920-х гг., а также работы Чень-Нин Янга и Роберта Миллса 1950-х гг., аналогично тому, что симметрия между всеми возможными точками наблюдения в общей теории относительности требует существования гравитационной силы, калибровочная симметрия требует существования других видов сил. Подобно тому, как чувствительная система контроля параметров окружающей среды поддерживает на постоянном уровне температуру, давление и влажность воздуха путем компенсации внешних воздействий, некоторые типы силовых полей, согласно Янгу и Миллсу, обеспечивают компенсацию сдвигов зарядов сил, сохраняя неизменность физических взаимодействий между частицами. В случае калибровочной симметрии, связанной со сдвигом цветовых зарядов кварков, требуемая сила представляет собой не что иное, как само сильное взаимодействие. Иными словами, если бы не было сильного взаимодействия, физика могла бы измениться при упомянутом выше сдвиге цветовых зарядов. Это показывает, что хотя гравитационное и сильное взаимодействия имеют совершенно различные свойства (вспомним, например, что гравитация гораздо слабее сильного взаимодействия) и действует на гораздо больших расстояниях), они, в определенном смысле, имеют общее происхождение: каждое из них необходимо для того, чтобы Вселенная обладала какой-то конкретной симметрией. Более того, аналогичные рассуждения, примененные к слабому и электромагнитному взаимодействиям, показывают, что их существование также связано с некоторыми видами калибровочной симметрии — так называемой слабой и электромагнитной калибровочной симметрии. Таким образом, все четыре взаимодействия непосредственно связаны с принципами симметрии.

Эта общая характеристика всех четырех взаимодействий, казалось бы, говорит в пользу предположения, сделанного в начале настоящего раздела. А именно, в наших

попытках объединить квантовую механику и общую теорию относительности мы должны вести поиск в направлении квантово-полевой теории гравитационного взаимодействия, следуя примеру успешной разработки квантово-полевых теорий трех других видов взаимодействия. На протяжении многих лет эта логика вдохновляла группу выдающихся физиков на разработку такой теории, однако путь к ней оказался усыян препятствиями, и никому не удалось пройти его полностью. Попытаемся понять почему.

Общая теория относительности и квантовая механика

Обычной областью применения общей теории относительности являются огромные, астрономические масштабы расстояний. Согласно теории Эйнштейна, на этих масштабах отсутствие массы означает, что пространство является плоским, как показано на рис. 3.3. Пытаясь объединить общую теорию относительности и квантовую механику, мы должны резко изменить фокусировку и исследовать свойства пространства в *микроскопическом* масштабе. Мы продемонстрировали это на рис. 5.1 путем последовательного увеличения масштаба и перехода к уменьшающимся областям пространства. По мере того, как мы увеличиваем масштаб, на первых порах не происходит ничего особенного; можно видеть, что на первых трех уровнях увеличения на рис. 5.1 структура пространства сохраняет свои основные свойства. Если подходить с субболомической точки зрения, мы могли бы рассчитывать на то, что такая спокойная и плоская структура пространства будет сохраняться все время, вплоть до любого, произвольно малого масштаба расстояний. Однако квантовая механика радикально меняет эту картину. Обычная радикально флуктуирующей, управляемой квантовых неопределенностей, является соотношением неопределенностей, является *все* — даже гравитационное поле. Хотя *все* — даже гравитационное поле в пустом пространстве равно нулю, квантовая механика показывает, что

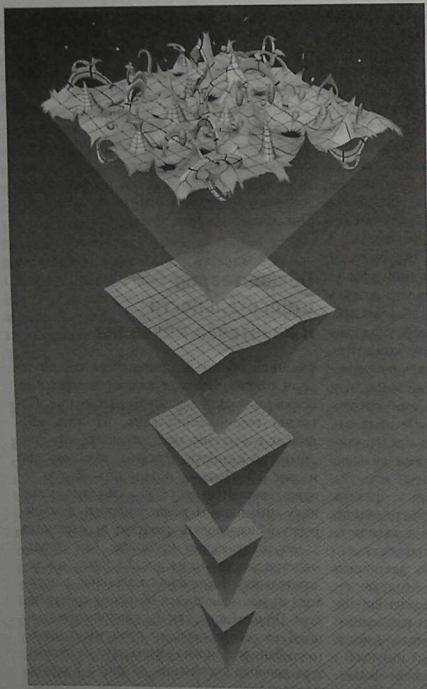


Рис. 5.1. Рассматривая область пространства при все большем увеличении, можно исследовать свойства пространства на ультрамикроскопическом уровне. Попытки объединить общую теорию относительности и квантовую механику наталкиваются на кипящую квантовую пену, проявляющуюся при самом большом увеличении

оно будет нулевым в среднем, а его текущее значение будет изменяться за счет квантовых флуктуаций. Более того, соотношение неопределенности говорит нам, что размер флуктуаций гравитационного поля будет возрастать при переходе ко все меньшим областям пространства. Квантовая механика показывает, что никому не нравится, когда его загоняют в угол; уменьшение пространственной фокусировки ведет к росту флуктуаций.

Поскольку гравитационное поле проявляется в кривизне пространства, эти кван-

товые флуктуации выражаются в его чудовищных деформациях. Мы можем наблюдать проявление таких деформаций на четвертом уровне увеличения на рис. 5.1. При переходе к еще меньшему масштабу расстояний, такому, как на пятом уровне рис. 5.1, мы видим, что случайные квантово-механические флуктуации гравитационного поля соответствуют такому сильному искривлению пространства, что оно совсем перестает напоминать мягко искривленные геометрические объекты типа резиновой пленки, ко-

торую мы использовали в качестве аналогии в главе 3. Скорее оно принимает вспененную, турбулентную и скрученную форму, показанную в верхней части рисунка. Джон Уилер предложил для описания такого хаоса, обнаруживаемого при изучении ультрамикроскопической структуры пространства (и времени), термин *квантовая пена* — описывающий незнакомую нам область Вселенной, в которой обычные понятия «налево и направо», «вперед и назад», «вверх и вниз» (и даже «до и после») теряют свой смысл. Именно на таких малых расстояниях мы сталкиваемся с фундаментальной несовместимостью общей теории относительности и квантовой механики. *Понятие гладкости геометрии пространства, являющееся основным принципом общей теории относительности, рушится под напором неистовых флуктуаций квантового мира, существующих в масштабе ультрамикроскопических расстояний.* В ультрамикроскопическом масштабе основное свойство квантовой механики — соотношение неопределенностей — вступает в прямое противоречие с центральным принципом общей теории относительности — гладкой геометрической моделью пространства (и пространства-времени).

На практике этот конфликт проявляется в весьма конкретном виде. Расчеты, основанные на совместном использовании уравнений общей теории относительности и квантовой механики, обычно дают один и тот же нелепый ответ: бесконечность. Подобно подзатылнику, полученному от школьного учителя старых времен, бесконечность в ответе — это способ, с помощью которого природа сообщает, что мы делаем что-то не так, как надо⁶. Уравнения общей теории относительности не могут справиться с безумным хаосом квантовой пены.

Заметим, однако, что по мере того, как мы возвращаемся к обычным масштабам расстояний (проходя последовательность на рис. 5.1 в обратном порядке), неистовые случайные колебания, свойственные микроскопическим расстояниям, начинают гасить друг друга. В результате (точно так же, как среднее по банковскому счету нашего маниакального заемщика не обнаруживает никаких признаков его мании) понятие гладкости

геометрии нашего пространства вновь становится точным. Это похоже на растровый рисунок в книге или газете: при взгляде издалека точки, образующие рисунок, сливаются и создают впечатление гладкого изображения, в котором вариации яркости плавны и незаметно изменяются от участка к участку. Однако если вы посмотрите на этот рисунок с более близкого расстояния, вы увидите, что он совсем не так гладок, как выглядит издалека. На самом деле он представляет собой набор дискретных точек, каждая из которых четко отделяется от других. Однако обратите внимание, что вы смогли узнать о дискретности рисунка, только рассмотрев его вблизи: издалека он выглядит гладким. Точно так же и структура пространства-времени кажется нам гладкой, за исключением тех случаев, когда мы исследуем ее с ультрамикроскопическим разрешением. Это объясняет, почему общая теория относительности работает на достаточно крупных масштабах расстояний (и времен), которые свойственны многим типичным астрономическим явлениям, но оказывается непригодной на микроскопических масштабах пространства (и времени). Центральный принцип гладкой и слабо искривленной геометрии соблюдается в большом масштабе, но нарушается под действием квантовых флуктуаций при переходе к микроскопическим масштабам.

Основные принципы общей теории относительности и квантовой механики позволяют рассчитать примерный масштаб расстояний, при переходе к которому становятся очевидными разрушительные явления, показанные на рис. 5.1. Малость постоянной Планка, которая управляет интенсивностью квантовых эффектов, и слабость константы гравитационного взаимодействия приводят к тому, что *планковская длина*, куда входят обе этих величины, имеет малость, которую превосходит всякое воображение: одна миллиардная от одной миллиардной от миллиардной от миллиардной доли сантиметра (10⁻³³). Таким образом, пятый уровень трану (10⁻³³)⁷. Таким образом, пятый уровень трану Вселенной (сchemатически изображает структуру рис. 5.1 схематически изображает структуру Вселенной) в ультрамикроскопическом, транспланковском масштабе расстояний. Чтосубпланковском масштабе, привебы дать представление о масштабах, приве-

дем такую иллюстрацию: если мы увеличим атом до размеров Вселенной, то планковская длина станет равной высоте среднего дерева.

Итак, мы видим, что несовместимость общей теории относительности и квантовой механики проявляется только в очень глубоко запрятанном королевстве Вселенной. У читателя может возникнуть вопрос, стоит ли вообще беспокоиться по этому поводу. Мнение физического сообщества по этому вопросу отнюдь не является единым. Есть физики, которые признают существование проблемы, но предпочитают применять квантовую механику и общую теорию относительности для решения таких задач, в которых типичные расстояния намного превосходят планковскую длину. Есть, однако, и другие ученые, которые глубоко обеспокоены тем фактом, что два фундаментальных столпа, на которых держится здание современной физики, в своей основе принципиально несовместимы, и неважно, что эта несовместимость проявляется только на ультрамикроскопическом масштабе расстояний. Несовместимость, говорят они, указывает на существенный изъян в нашем

понимании физического мира. Это мнение основывается на недоказуемой, но глубоко прочувствованной точке зрения, согласно которой понимание Вселенной на ее самом глубоком и наиболее элементарном уровне может дать нам ее логически непротиворечивое описание, все детали которого будут находиться в гармоничном единстве. И уж точно большинство физиков, независимо от того, какое значение это противоречие имеет для их собственных исследований, согласятся с тем, что основа наших самых глубоких теоретических представлений о Вселенной не должна представлять собой математически противоречивое лоскутное одеяло, скроенное из двух мощных, но конфликтующих теорий.

Физики неоднократно предпринимали попытки модифицировать общую теорию относительности и квантовую механику, чтобы разрешить это противоречие, однако эти попытки, среди которых были очень дерзкие и остроумные, терпели провал за провалом.

Так продолжалось до создания теории суперструн⁸⁾.

С давних времен музыка является источником метафорических образов для тех, кто пытается разгадать тайны Вселенной. Начиная с «музыки сфер» древних пифагорейцев и до «гармонии мира», на протяжении столетий направляющих наши научные поиски, мы пытаемся понять песь природы в величественных хороводах небесных тел и неистовой пляске субатомных частиц. С открытием теории суперструн музыкальные метафоры приобрели удивительную реальность, поскольку согласно этой теории микромир заполнен крошечными струнами, звучание которых оркеструет эволюцию мироздания. Согласно теории суперструн ветры перемен дуют через золотую арфу Вселенной.

В противоположность этому стандартная модель представляет элементарные компоненты мироздания в виде точечных образований, лишенных какой-либо внутренней структуры. Несмотря на необыкновенную мощь (как мы уже упоминали, практически все предсказания стандартной модели о свойствах микромира подтвердились с точностью до одной миллиардной от одной миллиардной доли метра, что представляет собой предел разрешающей способности современной техники), стандартная модель не смогла стать полной или «окончательной теорией», поскольку она не включает гравита-

ционного взаимодействия. Более того, все попытки включить гравитацию в квантово-механическую формулировку этой модели закончились неудачей из-за неистовых флуктуаций структуры пространства, проявляющихся на ультрамикроскопических расстояниях, т. е. на расстояниях, меньших планковской длины. Это неразрешенное противоречие явилось побудительным мотивом для поиска более глубокого понимания природы. В 1984 г. физик Майкл Грин, работавший в то время в колледже Королевы Марии, и Джон Шварц из Калифорнийского технологического института впервые представили убедительные доказательства того, что *теория суперструн* (или, кратко, *теория струн*) может дать такое понимание.

Теория струн предлагает оригинальное и глубокое изменение теоретического описания свойств Вселенной на ультрамикроскопическом уровне — изменение, которое, как постепенно осознают физики, модифицирует эйнштейновскую общую теорию относительности, делая ее полностью совместимой с законами квантовой механики. Согласно теории струн элементарные компоненты Вселенной не являются точечными частицами, а представляют собой крошечные одномерные волокна, подобные бесконечно тонким, непрерывно вибрирующим резино-

Часть III

КОСМИЧЕСКАЯ СИМФОНΙΑ

Глава 6

Только музыка, или Суть теории суперструн